



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

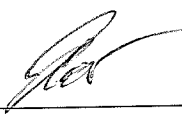
«Особенности влагообмена между океаном и атмосферой»

Исполнитель: Воронцова Анастасия Сергеевна

Руководитель: д.г.н., профессор Малинин Валерий Николаевич

«К защите допускаю»

И. о. заведующего кафедрой


(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«27» 06 2025г.

г. Санкт-Петербург

2025
1

Оглавление	
Введение	3
Глава 1. Обзор исследований влагосодержания атмосферы и температуры воздуха над океаном для условий современных изменений климата	5
1.1 Данные.....	5
1.2 Интерпретация и анализ данных ВА и ТВ	6
1.3 Парниковый эффект.....	9
1.4 Различные подходы к оценкам ВА, ТВ и их взаимосвязи.....	11
1.5 Изменения уровня океана.....	13
Глава 2. Исходные данные и методы.	19
2. 1 Исходные данные.....	19
2. 2 Методы исследования.....	20
Глава 3. Результаты расчётов и их обсуждение.....	23
3. 1 Меридиональное распределение характеристик температуры воздуха и влагосодержания атмосферы.	23
3. 2 Тренды влагосодержания атмосферы и температуры воздуха.	27
3. 3 Взаимосвязь зонально-осреднённых значений температуры воздуха и влагосодержания атмосферы.	31
Заключение	39
Использованная литература:	41

Введение

Взаимодействие атмосферы (газовой оболочки Земли) и Мирового океана (включая внутренние и окраинные моря) – одно из ключевых геофизических взаимодействий. В этой совокупности процессов обмена влагой, теплом, импульсом, солями и газами особенно выделяется влагообмен – едва ли не самая масштабная и крайне важная составляющая взаимодействия океана и атмосферы.

Влагообмен между океаном и атмосферой кажется простым – знакомым ещё с уроков природоведения – явлением, состоящим из процессов испарения воды с поверхности океана и осадков, выпадающих на его поверхность. Но оценки этих процессов довольно сложно произвести.

Большая часть испарения – около 85,5% – происходит с поверхности Мирового океана. Всего в год испаряется, примерно, $577 \cdot 10^3$ км³ вод, а содержание влаги в атмосфере колеблется около $14 \cdot 10^3$ км³. Эти колебания зависят от подстилающей поверхности и температуры и находятся в пределах 0,01 – 4,0 % по объёму у поверхности. Абсолютное содержание водяного пара выше в тёплом воздухе, следовательно, самые большие значения содержания водяного пара наблюдаются на экваторе, а самые малые на полюсах. Основная масса водяного пара содержится на высоте до 2-3 км, а над океанами влагосодержание выше, чем над сушей, то есть в целом влагосодержание атмосферы уменьшается с высотой и продвижением вглубь суши. Также изменчива эта характеристика и во времени – абсолютный максимум влажности воздуха наблюдается в самый тёплый месяц и – наоборот. [5]

Испарение воды в атмосферу это передача не только влаги, но и скрытой энергии. При испарении воды выделяется около 10^{24} Дж тепла. [5] Попад в атмосферу, водяной пар играет роль своеобразного теплоносителя – при фазовых переходах воды в атмосфере тоже выделяется и поглощается тепло. Помимо этого водяной пар задерживает до 60% теплового излучения с

волнами длиннее 20 мкм, тем самым он оказывается главным парниковым газом, в значительной степени влияя на изменения климата.

В связи с вышесказанным влагообмен океана и атмосферы тема далеко не однозначная и оказывается полем для споров и спекуляций. Этому способствуют и специфика предмета – трудноуловимые переходы состояния воды между океаном и атмосферой, и необходимость интерполяций и экстраполяций данных во времени и в пространстве, и разные подходы к оценкам данных, и т.д.

Наиболее важную роль в изменениях глобального климата играют тепловой и водный балансы атмосферы и их взаимосвязь над Мировым океаном. Главными характеристиками теплового и водного балансов являются температура воздуха и влагосодержание атмосферы. Поэтому основная цель данной работы состоит в исследовании межгодовой и меридиональной изменчивости температуры воздуха и влагосодержания атмосферы над Мировым океаном и их взаимосвязи в условиях современных изменений климата.

Основными задачами работы являются:

- выполнение обзора исследований влагосодержания атмосферы и температуры воздуха над океаном для условий современных изменений климата
- подготовка базы данных зонально-осреднённых значений температуры воздуха и влагосодержания атмосферы для Мирового океана
- оценка межгодовой изменчивости и трендов зонально-осреднённых значений влагосодержания атмосферы и температуры воздуха над океаном
- выявление особенностей взаимосвязи и влияния зонально-осреднённых значений влагосодержания атмосферы на температуру воздуха.

Глава 1. Обзор исследований влагосодержания атмосферы и температуры воздуха над океаном для условий современных изменений климата

1.1 Данные

Прежде чем говорить о дискуссии вокруг компонентов влагообмена, необходимо осветить существующие проблемы с гидрометеорологическими данными – пространственные и временные. Возможность наблюдать за изменениями на акватории Мирового океана появилась совсем недавно – в 2000 году был запущен и в 2007 году вышел на планируемый масштаб проект Argo, сеть из около 4000 океанографических буёв, покрывающих сейчас почти весь океан. [25] Имеющиеся же ряды длительных наблюдений сосредоточены, практически, исключительно в северном полушарии (Европа и Северная Америка) и – разумеется – это только береговые наблюдения. [4]

За последние несколько десятилетий были созданы десятки архивов реанализа климатических характеристик. Во многих из этих архивов есть данные по испарению (E) и осадкам (P), но – судя по нескольким попыткам сравнить эти архивы между собой и с так называемыми эталонными оценками¹ – не всем этим данным можно доверять.

В работе [15] автор сравнивает шесть архивов реанализа (1997-2013гг.) и обнаруживает большие ошибки в оценках испарения и осадков и связанные с этим различия в оценках $E - P$ – от $69 \cdot 10^3$ км³/год (архив J – OFURO) до – $24 \cdot 10^3$ км³/год (архив SEAFLUX).

В работе [22] проведено сравнение восьми архивов реанализа гидрометеорологических данных за период 2002-2008 гг. и хорошо описана ситуация, сложившаяся на данный момент: основное внимание обращено на то, что средние значения осадков (P), испарения (E) и, соответственно,

¹ «Эталонные» оценки суммарного притока пресных вод (Q), испарения (E) и осадков (P) для нынешнего столетия, основанные на данных 43 климатических моделей проекта CMIP5 [23], составляют соответственно 12, 133 и 121 см/год, или $43,3 \cdot 10^3$, $480,1 \cdot 10^3$, и $436,8 \cdot 10^3$ км³/год [11].

эффективного испарения ($E - P$) сильно разнятся между архивами; также отмечено, что значения $E - P$ для океана и $P - E$ для суши не совпадают и отличаются от наблюдаемых значений речного стока.

В итоге из восьми архивов в трёх эффективное испарение отрицательно, что физически невозможно (MERRA, ERA-40, CFSR), и только два архива показали результаты, приемлемые с точки зрения равновесия глобального гидрологического цикла – это архивы Japanese Meteorological Agency 25-year Reanalysis (JRA-25) и Twentieth Century Reanalysis (C20r). Впрочем, шесть лет это довольно короткий расчётный период и эти данные стоит рассматривать как приближённые. [9]

В работе [24] проведено сравнение двенадцати видов реанализа за гораздо более длительный период 1979-2014 гг. и средние оценки осадков и испарения составили 118 и 129 см/год. Эти значения немного ниже «эталонных» значений, но вполне с ними сопоставимы. Значит, при рассмотрении длинных временных рядов испарения и осадков, их среднемноголетние значения для большинства архивов реанализа становятся близкими к физическим критериям точности. [9]

1.2 Интерпретация и анализ данных ВА и ТВ

Проблема с данными – не единственный камень преткновения в дискуссии о влаге в атмосфере. Договорившись о степени доверия к данным, мы столкнёмся с их полярно-разной интерпретацией: в вопросах взаимного влияния климатических явлений, оценке вклада различных компонент в ГП и особенно – в вопросе степени антропогенного влияния на климатические изменения.

Один из самых дискуссионных климатических вопросов на данный момент это вопрос определения характера связи между ростом температуры и увеличением концентрации водяного пара в атмосфере. В расчётах количество водяного пара в атмосфере задают в виде интегрального

влажностисодержания атмосферы (ВА). Этот параметр представляет собой суммарный запас водяного пара в столбе воздуха единичной толщины и выражается в кг/м² или в толщине слоя воды (мм). Жидкий эквивалент ВА называется «осаждённая вода» (англ. – TPW, total precipitable water). [6]

Дискуссия о роли влажностисодержания атмосферы (ВА) в формировании климата началась, когда было установлено, что водяной пар (ВП) – основной парниковый газ. В работе [21] вклад водяного пара в парниковый эффект (ПЭ) оценён в 50%, вклад облачности – 25%, вклад CO₂ – 20%. Из этого соотношения очевидно, что ВА вносит основной вклад в ПЭ и является климатообразующим фактором. Этот тезис оспаривается одной из самых влиятельных групп учёных – Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). В своём Первом отчёте в 1990 г. [16] МГЭИК говорит о доминирующей роли водяного пара в формировании парникового эффекта, утверждает, что концентрация влаги в атмосфере полностью определяется внутренними свойствами климатической системы, и делает вывод: «...глобальное потепление — это, конечно же, результат CO₂, являющегося парниковым газом». После установления величины вклада водяного пара в ПЭ, в каждом новом отчёте МГЭИК акцент всё больше делается на главенствующей роли антропогенных выбросов CO₂ в усугублении парникового эффекта, роль водяного пара при этом преуменьшается. В Четвёртом отчёте МГЭИК в 2007 г. [17] опубликовано следующее утверждение: «увеличение концентрации водяного пара является ключевым следствием, но не причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними». В Шестом докладе в 2023 г. [18] водяной пар в атмосфере вообще не упоминается отдельно как фактор, влияющий на повышение температуры.

В работе «Влажностисодержание атмосферы как климатообразующий фактор» [11] авторы утверждают, что водяной пар в атмосфере и глобальное

потепление это взаимовлияющие явления, то есть – водяной пар не только следствие, но и причина ГП. В этой работе проведён анализ статистической связи между средними годовыми значениями ВА над МО и глобальной температуры воздуха. Данные по содержанию водяного пара взяты в базе http://ftp.remss.com/vapor/monthly_1deg/ [28]. Это спутниковые ежемесячные значения ВА в сетке $1^\circ \times 1^\circ$ с 1988 года, полученные в рамках проекта NASA Water Vapor Project. Исходные данные были пересчитаны с учётом площадей одноградусных квадратов на соответствующей широте и рассматривались в пределах с 60° ю.ш. по 60° с.ш. над свободной ото льда акваторией Мирового океана. Средние годовые значения аномалий глобальной приповерхностной температуры воздуха $\Delta T_{B_{гл}}$ взяты из архива HadCRUT 4 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/t2024/>) [29]. Необходимо отметить, что эти данные независимы по отношению друг другу.

Итак, значения влагосодержания атмосферы и температуры воздуха связаны друг с другом. На рисунке 1 сопоставлены средние годовые значения ВА и ТВ, осреднённые для Мирового океана в целом – за 1988 – 2016 гг. Из графика на рисунке 1 видна высокая линейная корреляция между значениями влагосодержания атмосферы и температурой воздуха: $r = 0,95$. Уравнение линейной регрессии между ВА и ТВ, рассчитанное методом наименьших квадратов, имеет следующий вид:

$$BA = 2,81TB - 19,9. (1)$$

Коэффициент детерминации этого уравнения $R^2 = 0,9$, средняя квадратическая ошибка $\sigma = 0,17$ мм, эти показатели вместе с графиком указывают на сильную связь между исследуемыми величинами, впрочем – не говоря ничего о причинно-следственных связях между ними.

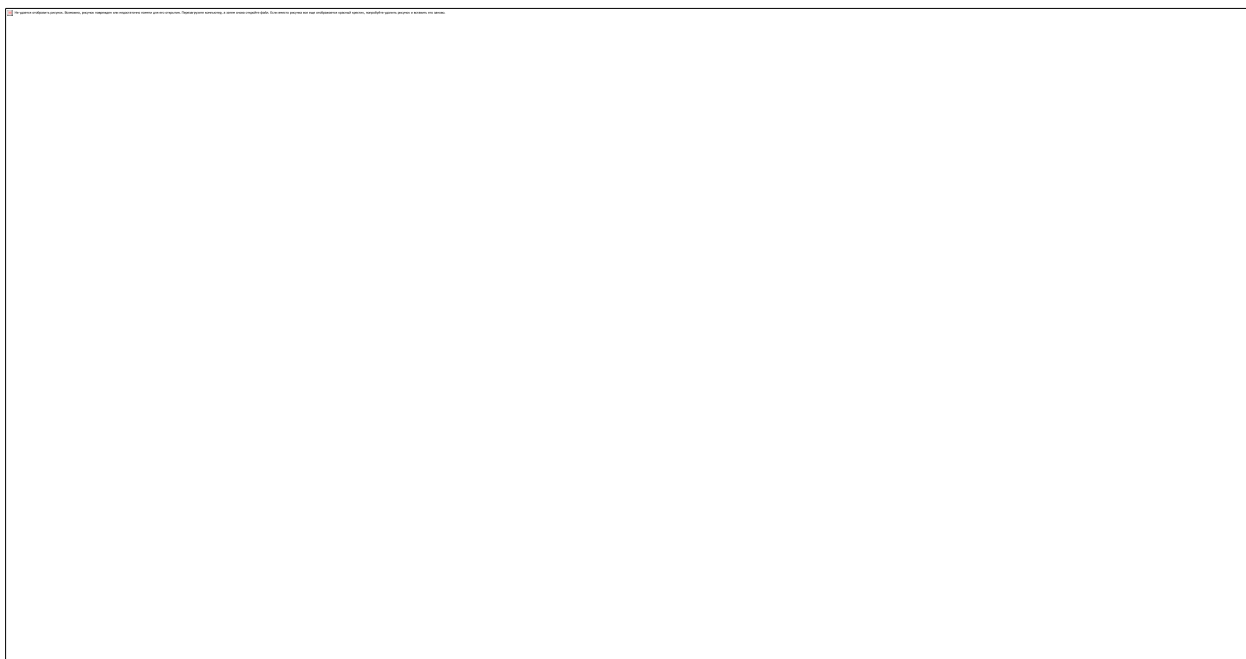


Рисунок 1 – График статистической связи между средними годовыми значениями ВА и ТВ над Мировым океаном за 1988-2016 гг. [11]

Таким образом, не стоит однозначно утверждать об одностороннем влиянии одной величины на другую, связь влагосодержания атмосферы и температуры воздуха, скорее всего, взаимна.

1.3 Парниковый эффект

Пожалуй, самая острая дискуссия ведётся по поводу степени влияния антропогенного водяного пара на глобальное потепление (ГП), а конкретно – о вкладе антропогенного водяного пара в парниковый эффект (ПЭ).

Механизм парникового эффекта на Земле таков: поверхность Земли нагревается солнечным излучением и становится источником теплового (длинноволнового инфракрасного) излучения. Часть этого излучения проходит сквозь атмосферу и рассеивается в космосе, а часть — отражается так называемыми парниковыми газами атмосферы и нагревает приземные воздушные слои. Важно отметить, что несмотря на негативный образ ПЭ, созданный масс-медиа в последние десятилетия, парниковый эффект сам по себе – важное условие существования жизни на Земле. Дело в том, что в отсутствие парниковых газов приповерхностная температура воздуха была

бы на 33°C меньше и климат Земли был бы практически непригоден для существования человеческой цивилизации [6].

Главными парниковыми газами на Земле являются водяной пар, CO_2 (углекислый газ), CH_4 (метан) и N_2O (закись азота). Основным считается водяной пар, определить это помогли численные модели циркуляции атмосферы: из модели общей циркуляции атмосферы поочерёдно удаляют разные парниковые газы, регистрируют изменения в модели и оценивают вклад каждого газа в ПЭ. Так, если оставить в модели только водяной пар, удалив остальные компоненты, можно получить максимальный вклад ВП в ПЭ. В таблице 1 [6] приведены оценки вкладов парниковых газов в ПЭ. Как видно, вклад водяного пара составляет около 50%, вклад облачности – 25%, CO_2 – 20%, вклад остальных газов суммарно не превышает 5%.

Суммарно парниковый эффект на Земле можно представить двумя составляющими – природной и антропогенной. Природными причинами ПЭ считаются несколько факторов – процессы взаимодействия океана и атмосферы, выбросы CO_2 и других парниковых газов при извержениях вулканов. Антропогенными причинами ПЭ являются выбросы CO_2 , водяного пара и других газов – происходящие при различных процессах человеческой деятельности.

Таблица 1 – Вклад атмосферных компонент в парниковый эффект по различным моделям общей циркуляции атмосферы [6]

--

Дискуссия по теме парникового эффекта ведётся сразу по нескольким вопросам: вклад антропогенной составляющей в ПЭ, роль водяного пара в

ПЭ, роль антропогенного водяного пара в ПЭ. Эксперты МГЭИК считают антропогенный ПЭ доминирующим, но их основной аргумент это резкий – экспоненциальный – рост выбросов CO_2 от человеческой деятельности. Роль же водяного пара антропогенного происхождения МГЭИК оценивает так «прямые выбросы водяного пара от антропогенной деятельности создают пренебрежимо малый вклад в радиационный форсинг²». То есть – и в вопросе взаимного влияния ВА и ТВ и в проблеме вклада антропогенного водяного пара в глобальное потепление эксперты МГЭИК занимают позицию отрицания большой роли водяного пара в росте температуры на Земле. Попробуем разобраться в периодах изменения температуры воздуха на Земле и сроках современного нам глобального потепления.

1.4 Различные подходы к оценкам ВА, ТВ и их взаимосвязи

В работе «Тренды компонент влагообмена в системе «океан-атмосфера» в условиях глобального потепления по данным архива Reanalysis-2» [9] в частности проведён анализ взаимосвязи между SAT – температуры воздуха (англ. sea air temperature) и TPW из архива NCEP-DOE (National Centers for Environmental Prediction, Department of Energy – Национальный центр экологических прогнозов США, Департамент энергетики) Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2). Из этого архива были выбраны среднемесячные значения характеристик для открытой водной поверхности Мирового океана между 70° с. ш. и 70° ю. ш. за период 1979–2019 гг. Данные были осреднены сначала по 10-градусным широтным зонам океана, а затем по Мировому океану в целом. Reanalysis-2 [27].

² Радиационный форсинг – это внешне обусловленное изменение притока радиации (коротковолновой и длинноволновой) к слою (на любом уровне – от верхней границы атмосферы до подстилающей поверхности) в системе Земля – атмосфера. [13]

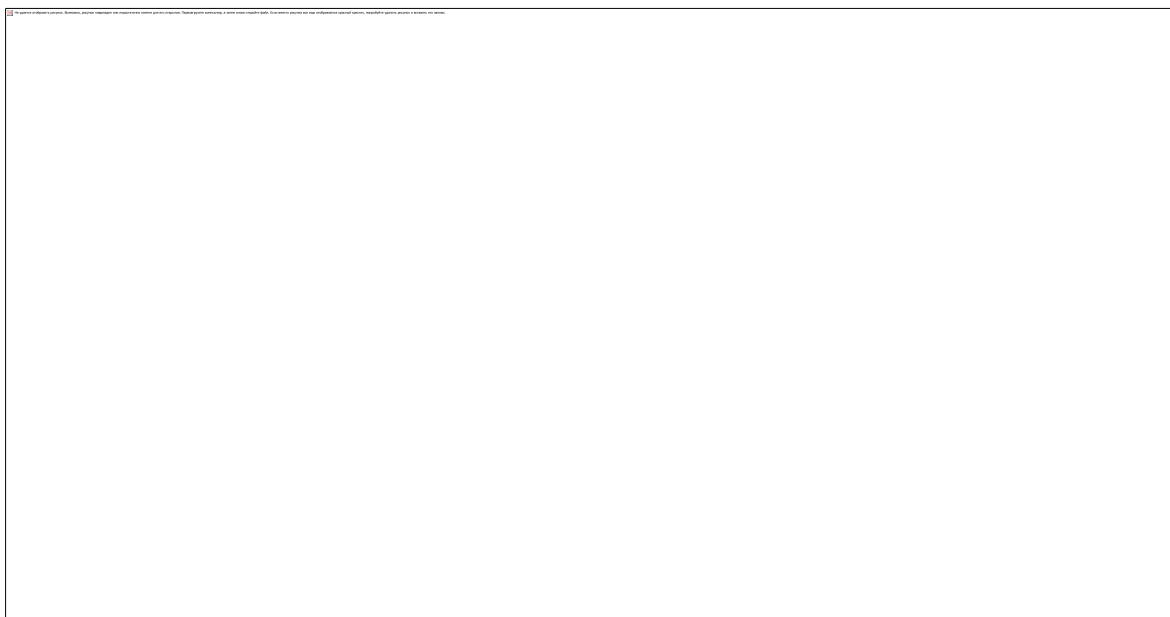


Рисунок 2 – Межгодовой ход годовых значений TPW – влагосодержания атмосферы (1) и SAT – температуры воздуха (2) над Мировым океаном в течение 1979-2019 гг. [9]

Из графиков на рисунке 2 очевидны довольно тесная связь TPW и SAT, а также два временных промежутка с различным направлением тренда обеих характеристик. В промежутке 1, с 1979 по 1993 гг., в ходе TPW и SAT явно виден отрицательный тренд, чуть более сильный в TPW, а в промежутке 2, с 1993 по 2019 гг., – обе характеристики быстро растут, а связь между ними немного ослабевает.

Таблица 2 – Оценки характеристик трендов годовых значений SAT и TPW над Мировым океаном для различных промежутков времени [9]

--

В таблице 2 показаны рассчитанные характеристики трендов TPW и SAT. В 1979-1993 отрицательные тренды TPW и SAT незначимы, в 1993-2019

величины трендов обеих характеристик увеличиваются на порядок; в обоих временных промежутках величина тренда TPW превышает величину тренда SAT. Для каждого из двух временных промежутков были рассчитаны уравнения регрессии и коэффициенты детерминации R^2 между TPW и SAT:

$$(1) \quad TPW = 3,21SAT - 28,29, R^2 = 0,91; (3)$$

$$(2) \quad TPW = 2,33SAT - 14,37, R^2 = 0,83. (4)$$

Исходя из расчётов выше, при изменении SAT на 1°C , TPW составляет: 11% (3,1 мм) в промежутке 1 и 8,2 % (2,3 мм) в промежутке 2. Эти значения, рассчитанные по данным, отличаются от значения, выведенного из уравнения Клаузиуса-Клапейрона, согласно которому, при повышении температуры на 1°C насыщающая упругость водяного пара увеличится на 6,5%. На это уравнение ссылается МГЭИК, утверждая, что водяной пар только следствие процесса глобального потепления. Эксперты МГЭИК считают, что между SAT и TPW существует следующая положительная обратная связь: повышается концентрация CO_2 (в основном, по антропогенным причинам), из-за этого повышается температура и абсолютная влажность воздуха, и в результате увеличивается TPW. Обратную связь эксперты МГЭИК игнорируют. Мы вернёмся к данному вопросу в Главе 3.

1.5 Изменения уровня океана

Говоря о влагообмене между океаном и атмосферой, нельзя обойти вниманием вопрос изменения уровня Мирового океана, хотя это вопрос более широкий, включающий в себя взаимодействие с литосферой. Уровень Мирового океана (УМО) – самый очевидный и, пожалуй, самый важный для человечества климатический показатель. В двадцатом веке УМО рос со скоростью, примерно, 1,7-1,8 мм/год, а в начале двадцать первого века уже растёт со скоростью 3,2 мм/год. Прогнозы обещают, что к концу века уровень может повыситься на 40-100 см (по разным оценкам). [7]

Если климатическая обстановка будет развиваться именно так, это станет катастрофой для важных экосистем и для большого числа людей – так как в прибрежных районах живёт большая часть населения Земли. При продолжающемся росте УМО произойдёт подтопление и затопление обширных и густонаселённых площадей, расположенных на равнинах вблизи океанского берега – в первую очередь это Бангладеш, Нидерланды, полуостров Флорида и восточное побережье Северной Америки, Лондон с пригородами, территории на Филиппинах и в Индонезии, Санкт-Петербург, Калининградская область и ещё некоторые территории.

В мире уделяется большое внимание проблеме повышения УМО, тщательные спутниковые мониторинги проводятся во Франции и США. В России долгое время выполнялись лишь региональные исследования уровня. Но в РГГМУ в начале двадцать первого века были произведены работы, включающие в себя: исследования закономерностей межгодовых колебаний уровня Мирового океана, изучение происхождения этих колебаний, оценку вкладов разных факторов, влияющих на УМО, а также создание физико-статистических моделей прогноза уровня. [7]

Сейчас существует два принципа получения данных об уровне океана – метод спутниковой альтиметрии и береговые измерения (мареографы). У каждого подхода есть достоинства и недостатки: спутниковые данные охватывают почти всю акваторию Мирового океана, но длительность этих наблюдений невелика, зато многолетние ряды данных есть на береговых пунктах наблюдений. Именно по этим данным можно изучать длительные колебания УМО. [4]

В рамках исследований [7] в РГГМУ была создана статистическая модель, с помощью которой реконструированы колебания УМО за период 1861-2005 (см. рис. 3). В среднем за этот период скорость роста уровня составила 1,4 мм/год. Тренд при этом описывает 94% дисперсии ряда, что

означает высокую степень значимости тренда и говорит об очевидной закономерности.



Рисунок 3 – Сопоставление временных рядов УМО, рассчитанных разными авторами: 1 – модель РГГМУ; 2 – данные [14]; 3 – данные [19]

На протяжении наблюдаемого периода можно отметить несколько периодов колебаний уровня с соответствующими локальными трендами, например:

1861-1877 – сравнительно быстрый рост ($Tr = 2$ мм/год)

1879-1923 – стагнация ($Tr = 0,4$ мм/год)

1923-2005 – довольно быстрый рост ($Tr = 2$ мм/год).

На рисунке 3 (стр. 15) сопоставлены ряды, рассчитанные по модели РГГМУ, с рядами двух других реконструкций. Можно убедиться, что модель РГГМУ вполне сопоставима с аналогичными исследованиями.

Помимо отслеживания роста УМО, важно понимать, что вносит наибольший вклад в этот рост. Все влияющие факторы можно разделить на три группы – космогеофизические силы, геодинамические и гидрометеорологические процессы. Первые две группы факторов незначимы – сравнительно с факторами третьей группы [1], [4]. Факторами, вносящими наибольший вклад в изменения уровня, являются гидрометеорологические

процессы, вызывающие объёмные изменения УМО – эвстатические и стерические колебания. Эвстатические колебания это испарения, осадки и поверхностный сток, а стерические колебания связаны с изменениями плотности морской воды. За исключением поверхностного стока все эти причины связаны с глобальной температурой воздуха, поэтому можно считать изменения уровня Мирового океана индикатором изменений климата. [7]

Оценки трендов факторов, влияющих на уровень, логично разделить на три категории: сравнительно точные оценки трендов могут быть получены с помощью ИСЗ для суммарного притока пресных вод в океан, менее точные оценки ожидаемо получатся в трендах характеристик вертикального влагообмена, и наиболее сложными для расчётов являются тренда в стерических колебаниях уровня. В таблице 3 представлены результаты выполненных в РГГМУ исследований факторов, влияющих на УМО, и сравнения вычисленного тренда с фактическим.

Таблица 3 – Оценки вклада различных факторов в формировании тренда УМО за 1980-2005 и 1993-2003 гг. с использованием уравнения пресноводного баланса Мирового океана, мм/год [7]

В свете нашей темы обратим внимание на значения вклада вертикального влагообмена – 0,62 из 1,56 мм/год (1980-2005 гг.) и 0,43 из 2,88 мм/год (1993-2003 гг.) в сравнении с другими факторами. Также отметим довольно значимую величину невязки с данными наблюдений – 0,23 и 0,22 мм/год за период 1980-2005 и 1993-2003 гг., соответственно. Невязка обычно состоит

из суммарной ошибки всех факторов и неучтённых в данных расчётах факторах.

Формулу межгодовых колебаний уровня можно записать так

$$\Delta h_M = \Delta h_{\Sigma} + \Delta h_{стер} \quad (5)$$

Далее изучение причин межгодовых изменений УМО возможно двумя способами. Один из них используется в исследованиях зарубежных авторов, это представление изменения УМО как составляющей баланса взаимодействующих резервуаров гидросферы:

$$\Delta h_M = A_M^{-1}(-\Delta V_K - \Delta V_L + \Delta V_{стер}) \quad (6)$$

Δh_M – внутригодовые изменения УМО; A_M – площадь Мирового океана; V_K – изменения массы воды криосферы; V_L – изменения запасов поверхностных и подземных вод суши.

Другой подход (используемый в РГГМУ) для оценки вкладов рассматривает уравнение пресноводного баланса как сумму эвстатических и стерического факторов:

$$\Delta h_M = A_M^{-1}(P_{MO} + M + I - E_{MO} + \Delta V_{стер}) \quad (7)$$

Здесь P_{MO} – осадки над океаном; M – материковый сток в океан; I – ледниковый сток в океан; E_{MO} – испарение с поверхности океана

В первом подходе используется метод трендов – сравнивается фактический тренд УМО с суммой предварительно рассчитанных линейных трендов факторов, влияющих на УМО, за разные промежутки времени. В. Н. Малинин отмечает, что «метод трендов позволяет лишь приближенно судить о вкладе отдельных факторов, ибо сильно зависит от величины тренда и вклада коэффициента детерминации тренда в дисперсию исходного процесса» [7]. В своей работе «Изменения уровня Мирового океана и климата» [7] он предлагает использовать второй подход, опирающийся на

уравнение (7), так как его компоненты проще определяются и точнее контролируются, нежели компоненты уравнения (6).

Таблица 4 – Характеристики линейного тренда в межгодовых колебаниях испарения и осадков над отдельными океанами и Мировым океаном в целом за период 1980–2005 гг. по данным [12]



Если рассмотреть оценки межгодовой изменчивости испарения, осадков и эффективного испарения, рассчитанные в работе [12] по данным реанализа CDAS (Climate Data Assimilation System) за 1980-2006 гг., то в рядах испарения и осадков виден выраженный положительный тренд, описывающий больше 50% дисперсии (таблица 3, стр. 18). Тренд в осадках равен 4,2 мм/год, тренд испарения равен 3,6 мм/год, тренд эффективного испарения – отрицателен, поэтому в исследуемый период наблюдался рост уровня Мирового океана со скоростью 0,6 мм/год (около 217 км³/год).

Глава 2. Исходные данные и методы

2. 1 Исходные данные

В качестве источника исходных данных в нашей работе использован архив Reanalysis-2 (R-2) департамента энергетики национального центра экологических прогнозов США (NCEP-DOE - National Centers for Environmental Prediction, Department of Energy). Получение данных обеспечивают спутники NOAA, к которым относятся TIROS-N, NOAA-6,-7,-9,-11,-12 [8].

Архив Reanalysis-2 — продолжение проекта NCEP-NCAR Reanalysis-1 (R-1), точнее исправленная и дополненная версия Reanalysis-1. В своё время в Reanalysis-1 было обнаружено несколько ошибок обработки данных, причиной которых стал человеческий фактор. Обнаруженные ошибки разнились по масштабам — были среди них и весьма важные неточности.

Такова, например, ошибка в расположении данных в южном полушарии, которая привела к смещению местоположения наблюдения на 180° . Поэтому R-1 был признан непригодным для проведения тематических исследований по внетропическим условиям Южного полушария в течение 1979-1992 гг. Также альbedo над океаном было слишком большим (около 0,15) из-за ошибки программирования. В Reanalysis-2 значения альbedo приведены к более реалистичным — около 0,06-0,07. Исправлена ошибка в сроках таяния снега в модели, в которой преобразование снега в воду в Reanalysis-1 было завышено в 1000 раз. А также были усовершенствованы физика модели и приёмы диагностики, проведены работы в области архивирования, распределения, мониторинга и прогнозирования.

Reanalysis-2 особенно важен пользователям, на чьи исследования могут повлиять ошибки в R-1. Примеры таких исследований включают в себя анализ переходных процессов в Южном полушарии; использование приземных температур и снежного покрова на континентах Северного

полушария зимой, особенно в высоких широтах; анализ влажности почвы; анализ снежного покрова; чувствительность анализа к изменениям в модели ассимиляции. R-2 предоставляет более точные данные о температуре у поверхности суши, гидрологическом состоянии поверхности суши, и потоках радиации над океаном.

Авторы проекта настойчиво рекомендуют не рассматривать Reanalysis-2 как реанализ следующего поколения – скорее как улучшенную версию R-1. По мнению авторов «реанализ следующего поколения будет в большей степени сосредоточен на точности, разрешении и долгосрочных тенденциях за счёт учёта осадков, спутниковой радиации и других дистанционных наблюдений с использованием улучшенной процедуры анализа, основанной на 4D-вариационной оценке». Более подробно ознакомиться со сходствами и различиями R-1 и R-2 можно прочитав специальные статьи, указанные на сайте Reanalysis-2 [27]. Там же доступно большинство данных.

В настоящее время рассматривается возможность продления R-2 на доспутниковый период (до 1979 года).

Для данной работы из архива были выбраны среднемесячные значения влагосодержания атмосферы (ВА) и температуры воздуха (ТВ) для открытого океана с 1979 по 2018 годы. Эти значения были осреднены по десятиградусным широтным зонам, а после – по всей акватории Мирового океана.

2. 2 Методы исследования

В работе нами использовались следующие статистические методы. [3]

1. Расчёт первичных статистик, позволяющих исследовать структуры изучаемых рядов данных:

1. 1 Показатели положения (мы использовали только среднее арифметическое $\bar{X}$, характеризующее центр тяжести исследуемой характеристики или точку её равновесия при различных колебаниях.).

1. 2 Показатели разброса (мы использовали дисперсию (D) и стандартное (или среднее квадратическое) отклонение (σ), характеризующие рассеяние значений ряда от среднего арифметического значения; а также – коэффициент вариации (C), характеризующий степень изменчивости характеристики в исследуемой выборке). Формулы для вычисления этих показателей:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (8);$$

где n – длина ряда (количество значений характеристики);

$$\sigma = \sqrt{D} \quad (9);$$

$$C = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100\% \quad (10).$$

1.3 Показатели, описывающие закон распределения для определения степени совпадения кривых распределения значений ТВ и ВА и кривой нормального распределения). Мы использовали только коэффициенты асимметрии (As) и эксцесса (Ex). Формулы асимметрии и эксцесса:

$$As = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{N\sigma^3} \quad (11);$$

$$Ex = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma^4} \right] - 3 \quad (12).$$

2. Расчёт трендов временного ряда и оценка их значимости (по критической величине коэффициента корреляции и по критерию Стьюдента).

Трендовая составляющая говорит о наличии в изменчивости переменной долгосрочного колебания с периодичностью, значительно превышающей длительность рассматриваемого ряда данных.

3. Корреляционный анализ, использующийся для оценки силы и формы связи между двумя (в нашей работе) переменными.

4. Множественная линейная регрессия – была использована для оценки взаимосвязи значений ТВ и ВА. Оценка качества моделей регрессии проводилась по четырём характеристикам.

- 1) Оценка значимости коэффициентов регрессии a_0 и a_1 ;
- 2) Значения коэффициентов детерминации R^2 ;
- 3) Оценки стандартной ошибки модели;
- 4) Проверка адекватности по критерию Фишера.

С использованием полученных моделей для каждой широтной зоны были рассчитаны изменения ВА при повышении ТВ на один градус и дана оценка результатов.

Глава 3. Результаты расчётов и их обсуждение

3. 1 Меридиональное распределение характеристик температуры воздуха и влагосодержания атмосферы

Рассмотрим первичные статистики ТВ (табл. 5). Значения коэффициентов вариации ТВ $C \ll 33\%$ свидетельствуют о малой межгодовой изменчивости характеристики, т. е. об однородности выборки. Подробнее рассмотрим ниже, в совмещённом графике $C, \%$ обеих характеристик.

Таблица 5 – Расчёт средних значений, стандартного отклонения, коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса температуры воздуха

Зона	$\bar{X}, ^\circ\text{C}$	$\sigma, ^\circ\text{C}$	$C, \%$	As	Ex
50-60° N	5,17	0,42	8,122	0,22	-0,82
40-50° N	10,73	0,29	2,665	-0,17	-0,48
30-40° N	17,27	0,26	1,512	-0,14	-0,94
20-30° N	22,60	0,22	0,969	0,71	-0,04
10-20° N	25,81	0,17	0,647	0,52	0,37
0-10° N	26,45	0,20	0,771	-0,07	0,29
0-10° S	25,97	0,20	0,785	0,24	-0,19
10-20° S	24,36	0,16	0,636	1,00	1,65
20-30° S	20,80	0,15	0,716	-0,35	0,16
30-40° S	15,83	0,20	1,264	-0,25	-0,52
40-50° S	9,81	0,05	0,551	0,41	-0,82
50-60° S	3,87	0,18	4,601	0,47	0,02

Асимметрия значений ТВ слабо выражена на экваториальных широтах ($As < 0,25$), умеренно выражена в южном полушарии ($0,25 < As < 0,5$), сильно выражена в зонах 10-20° и 20-30° с.ш (0,52 и 0,71, соответственно), а наиболее сильно асимметрия выражена в зоне 10-20° ю.ш. Положительные значения асимметрии ТВ встречаются немного чаще, чем отрицательные (семь против пяти), значит, в соответствующих широтах временной ряд включает немного больших по величине положительных отклонений, и

много менее значительных по величине отрицательных отклонений от среднего значения.

В коэффициентах эксцесса значений ТВ немного преобладают отрицательные значения – семь против пяти положительных. Эмпирическая кривая распределения значений ТВ в зонах с отрицательными коэффициентами эксцесса более плоская, нежели нормальная кривая распределения, а в зонах с положительными коэффициентами эксцесса – более островершинная, нежели нормальная.

Таким образом, наиболее близкими к нормальному распределению являются распределения значений ТВ в двух экваториальных зонах – $0-10^\circ \text{ N}$ ($A_s = -0,07$ и $E_x = 0,29$) и $0-10^\circ \text{ S}$ ($A_s = 0,23$ и $E_x = -0,2$), что является следствием взаимодействия большого числа сравнительно слабых и примерно равноценных влияющих факторов. Наименее близким к нормальному распределению является распределение значений ТВ в зоне $10-20^\circ \text{ S}$ ($A_s = 1,00$ и $E_x = 1,65$), что означает наличие одного-двух преобладающих факторов, влияющих на распределение значений ТВ. Отметим, что значение эксцесса $E_x > 1$ говорит о наличии в ряду «выбросов», которые могут свидетельствовать об ошибках наблюдения или катастрофических эффектах (зона $10-20^\circ \text{ S}$).

Далее рассмотрим первичные статистики ВА (табл. 6). Значения коэффициентов вариации ВА ($C \ll 33\%$) свидетельствуют о малой межгодовой изменчивости этой характеристики.

Асимметрия значений ВА слабо выражена в зонах $0-10^\circ$ и $20-30^\circ$ с.ш., а также полярнее 40 -х широт обоих полушарий. Асимметрия значений ВА умеренно выражена в зоне $30-40^\circ$ с.ш. и сильно выражена южнее экватора до 30° ю.ш. максимально сильно – в $10-20^\circ$ ю.ш. В меридиональном распределении асимметрии значений ВА положительные значения встречаются вдвое чаще, чем отрицательные (8 против 4), значит, в

соответствующих широтах временной ряд значений ВА включает немного больших по величине положительных отклонений, и много менее значительных по величине отрицательных отклонений от среднего значения.

Таблица 6 – Расчёт средних значений, стандартного отклонения, коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса влагосодержания атмосферы

Зона	$\bar{X}$, кг/м ²	σ , кг/м ²	C, %	As	Ex
50-60° N	14,31	0,37	2,613	-0,13	-0,05
40-50° N	19,88	0,41	2,057	-0,03	-0,57
30-40° N	25,95	0,45	1,746	0,50	-0,25
20-30° N	31,86	0,47	1,482	1,13	1,51
10-20° N	38,82	0,74	1,906	0,23	0,25
0-10° N	45,36	0,87	1,907	-0,22	-0,80
0-10° S	41,87	0,87	2,083	0,78	0,75
10-20° S	35,19	0,58	1,648	1,28	1,92
20-30° S	28,81	0,35	1,208	0,95	2,14
30-40° S	22,93	0,25	1,108	0,05	-0,47
40-50° S	17,07	0,22	1,266	-0,05	-0,57
50-60° S	11,59	0,16	1,338	0,16	-0,66

В коэффициентах эксцесса ВА пять положительных значений – в зонах 10-20° N, 20-30° N и трёх зонах на юг от экватора, значит, кривая распределения значений характеристики в этих зонах является более островершинной по сравнению с нормальной кривой распределения. В семи других зонах – 0-10° N и по три зоны полярнее 30° в каждом полушарии – значения эксцесса отрицательны, значит, в этих широтах кривая распределения значений ВА более плоская, нежели нормальная кривая.

Значения асимметрии и эксцесса $As > 1$, $Ex > 1$ говорят о наличии в ряду «выбросов», которые могут свидетельствовать об ошибках наблюдения или катастрофических эффектах (зоны 20-30° N, 10-20° S, 20-30° S).

Таким образом, наиболее близким к нормальному распределению является распределение значений ВА в зоне 10-20° N с $As = 0,23$ и $Ex = 0,25$, что является следствием взаимодействия большого числа сравнительно слабых и примерно равноценных влияющих факторов. Наименее близкими к нормальному распределению являются распределения значений ВА в зоне 20-30° N и три зоны южнее экватора (0-30° S), что означает наличие одного-двух преобладающих факторов, влияющих на распределение значений ВА.

Рассмотрим графики меридионального распределения средних значений и коэффициента вариации исследуемых характеристик. На рисунке 4 можно увидеть особенности меридионального распределения средних значений ВА и ТВ – характер их распределения схож: значения увеличиваются от полюсов к экватору, однако, график средних значений ТВ несколько сглажен по сравнению с графиком ВА, то есть меридиональная изменчивость ТВ несколько меньше меридиональной изменчивости ВА.

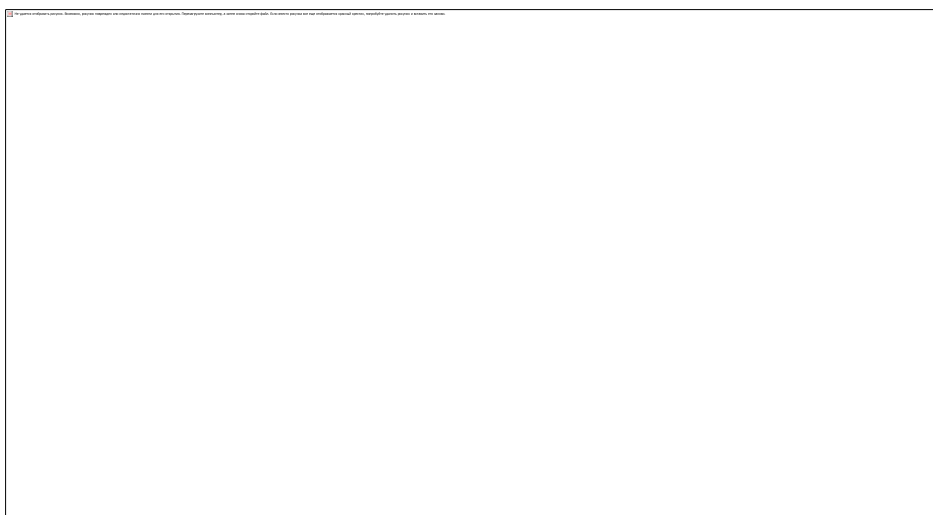


Рисунок 4 – Совмещённые графики меридионального распределения средних значений влагосодержания атмосферы (1) и температуры воздуха (2)

Межгодовую изменчивость ТВ и ВА можно увидеть на совмещённом графике меридионального распределения коэффициента вариации (рис. 5). Как мы сказали выше, коэффициенты вариации обеих характеристик малы, что указывает на их малую межгодовую изменчивость, но графики наглядно демонстрируют разницу в характере распределения коэффициентов вариации ВА и ТВ. Так коэффициенты вариации ТВ просто снижаются от полюсов к экватору, а коэффициенты вариации ВА снижаются от полюсов зонам 20-30° N и 30-40° S, а далее снова возрастают к экватору. Также стоит отметить, что коэффициенты вариации ВА в большей части зон выше коэффициентов вариации ТВ, то есть межгодовая изменчивость ВА немного выше межгодовой изменчивости ТВ.

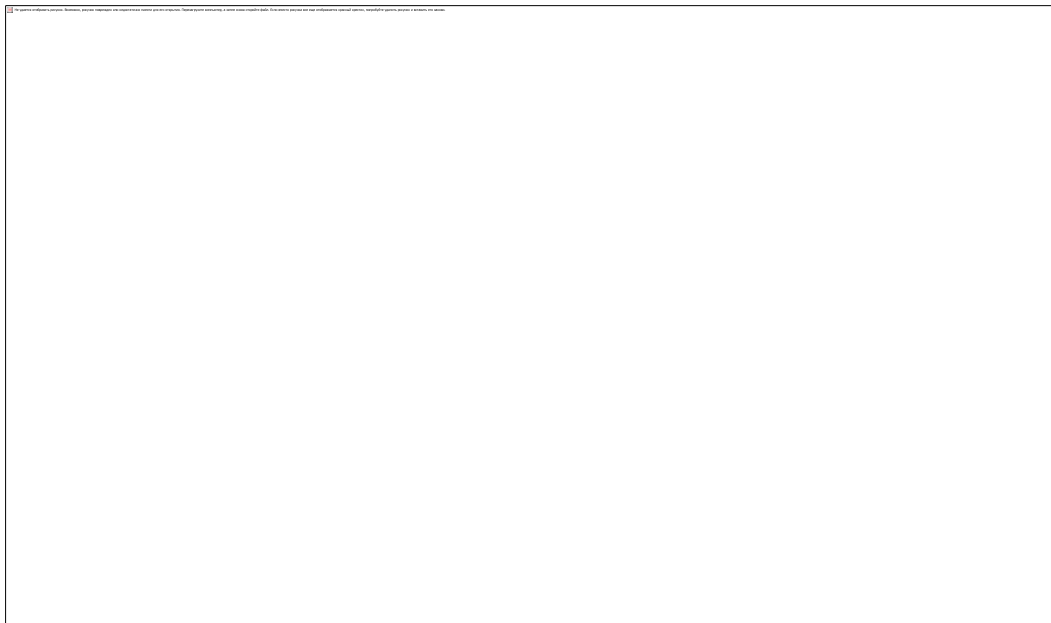


Рисунок 5 – Совмещённые графики меридионального распределения коэффициентов вариации влагосодержания атмосферы (1) и температуры воздуха (2)

3. 2 Тренды влагосодержания атмосферы и температуры воздуха

Для каждой широтной зоны были рассчитаны коэффициенты тренда, а также – безразмерные индексы тренда, для возможности сравнения трендов

ТВ и ВА между собой (табл. 7 и 8). В данном случае свободный член a_0 показывает условное значение ряда $X(t)$ при $t = 0$. Угловой коэффициент (коэффициент регрессии) a_1 представляет собой величину тренда (Tr), означающую скорость повышения (понижения) рассматриваемой характеристики в единицу времени.

Индекс тренда рассчитывается как отношение размаха тренда ($a_1 n$) к его среднему значению ($\bar{X}$) и выражается в условных единицах [10]:

$$I_{\text{тр}} = 100 * a_1 * n / \bar{X} \quad (13).$$

Здесь a_1 – угловой коэффициент уравнения линейного тренда $X = a_1 t + a_0$, характеризующий скорость изменения X в единицу времени t , n – период времени в годах. Индекс тренда – безразмерная величина, что необходимо и удобно для сравнения характеристик разной размерности и даже одной размерности, но значительно различающихся по абсолютной величине.

Таблица 7 – Уравнения трендов, индексы трендов, коэффициенты детерминации и корреляции, а также t-критерий температуры воздуха (ТВ)

Зона	Ур-е тренда	I Tr, %	R^2	R	t
50-60° N	0,027x + 4,586	20,89	0,63	0,79	7,98
40-50° N	0,019x + 10,31	7,08	0,68	0,83	9,05
30-40° N	0,018x + 17,03	4,17	0,73	0,85	10,16
20-30° N	0,015x + 22,27	2,65	0,71	0,84	9,53
10-20° N	0,008x + 25,63	1,24	0,37	0,61	4,69
0-10° N	0,004x + 26,35	0,60	0,07	0,27	1,70
0-10° S	0,004x + 25,84	0,62	0,07	0,26	1,67
10-20° S	0,002x + 24,3	0,33	0,04	0,20	1,27
20-30° S	0,006x + 20,65	1,15	0,31	0,56	4,12
30-40° S	0,008x + 15,63	2,02	0,28	0,53	3,85
40-50° S	0,01x + 9,587	4,08	0,29	0,54	3,94
50-60° S	0,008x + 3,683	8,27	0,35	0,59	4,55

Оценку значимости трендов проведем по критической величине коэффициента корреляции $r_{кр} \approx \frac{2}{\sqrt{n+2}} \approx 0,31$. При $R > r_{кр}$ тренд считается значимым. Так значимыми являются тренды ТВ во всем северном полушарии и зонах 20-30°, 30-40° южного полушария, а также все тренды ВА за исключением трендов в зонах 0-10°, 10-20°, 20-30° южного полушария.

Таблица 8 – Уравнения трендов, индексы трендов, коэффициенты детерминации и корреляции, а также t-критерий влагосодержания атмосферы (ВА)

Зона	Ур-е тренда	I Тр, %	R^2	R	t
50-60° N	0,024x + 13,8	6,71	0,59	0,77	7,35
40-50° N	0,027x + 19,32	5,43	0,60	0,77	7,53
30-40° N	0,031x + 25,3	4,78	0,65	0,80	8,36
20-30° N	0,027x + 31,28	3,39	0,47	0,69	5,83
10-20° N	0,041x + 37,97	4,22	0,42	0,65	5,26
0-10° N	0,03x + 44,72	2,65	0,17	0,42	2,83
0-10° S	- 0,007x + 42,02	- 0,67	0,01	0,10	0,62
10-20° S	0,004x + 35,1	0,45	0,01	0,08	0,52
20-30° S	0,009x + 28,61	1,25	0,10	0,32	2,10
30-40° S	0,013x + 22,65	2,27	0,37	0,61	4,75
40-50° S	0,005x + 16,95	1,17	0,09	0,30	1,91
50-60° S	0,007x + 11,42	2,42	0,34	0,58	4,40

Оценка значимости тренда по критерию Стьюдента полностью согласуется с оценкой по критической величине коэффициента корреляции $r_{кр}$. Запишем нулевую гипотезу по отношению к коэффициенту регрессии a_1 и коэффициенту корреляции между временным рядом и трендовой компонентой $r_{(X,T)}$: $H_0: |a_1| = 0$; $H_0: |r_{(X,T)}| = 0$. Для проверки этих гипотез рассчитаем выборочный критерий Стьюдента $t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$ и сравним их с его критическим значением $t_{кр}(0,05; n - 2) \approx 2,02$. Из сравнения видно, что

зоны, где тренд (не)значим по критерию Стьюдента совпадают с зонами, где тренд (не)значим по критической величине коэффициента корреляции.

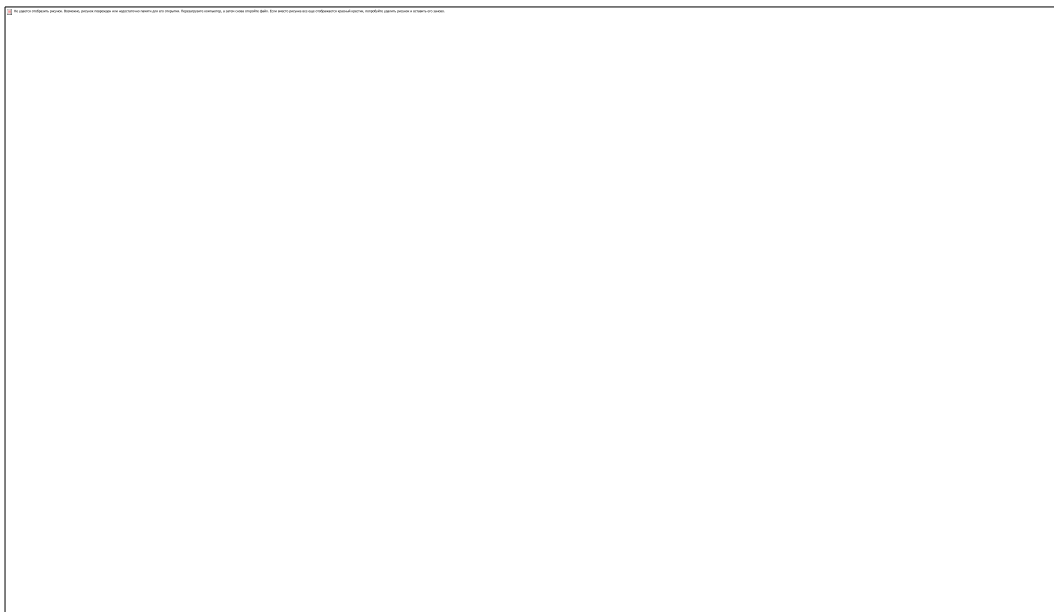


Рисунок 6 – График меридионального распределения индекса тренда температуры воздуха

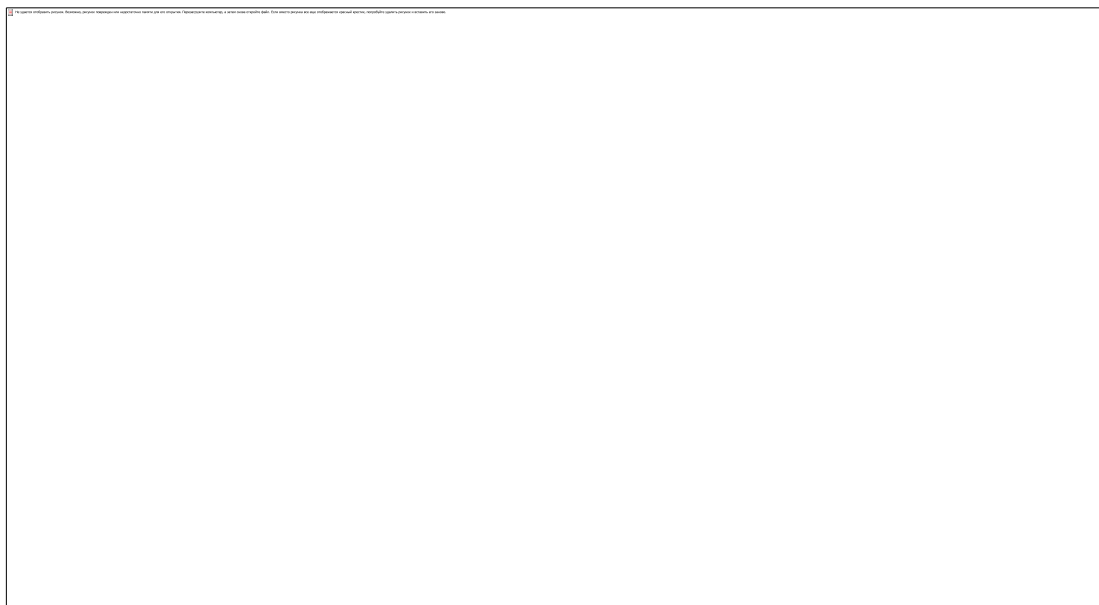


Рисунок 7 – График меридионального распределения индекса тренда влагосодержания атмосферы

На рисунках 6 и 7 даны графики меридионального распределения индекса тренда ТВ и ВА, соответственно. Можно проследить, что в целом

эти распределения схожи – минимальные значения индексы тренда обеих величин принимают близ экватора и наращивают значения к полюсам. Различия же меридионального распределения индексов тренда ТВ и ВА в характере его изменчивости – его значения для ТВ меняются плавно и почти зеркально отражены по линии экватора за исключением 50-60°, а значения для ВА и несимметричны относительно линии экватора и имеют явный перекося больших значений I_{Tg} в сторону северного полушария. Возможно, это связано с тем, что в северном полушарии большую часть года находится внутритропическая зона конвергенции (ВЗК), что в свою очередь может быть следствием общей асимметрии климатической системы в Северном и Южном полушариях [17].

3. 3 Взаимосвязь зонально-осреднённых значений температуры воздуха и влагосодержания атмосферы

Выше нами рассмотрено меридиональное распределение значений ТВ и ВА 1979-2018 гг. Перейдём к анализу взаимосвязи значений этих характеристик с использованием корреляционного и регрессионного анализов. Коэффициенты корреляции позволят выявить наличие связи между переменными и оценить степень тесноты этой связи. Регрессионный анализ поможет установить формы зависимости между переменными и глубже проанализировать их взаимосвязь.

На рисунке 8 представлен график меридионального распределения коэффициентов корреляции (R) ВА и ТВ. В семи зонах из 12-ти значения R превышают 0,8 ($R_{\text{макс.}} = 0,92$ в зоне 50-60° с.ш.), в остальных пяти зонах $R > 0,6$ ($R_{\text{мин.}} = 0,62$ в зоне 20-30° ю.ш.). $R = 1$ означает наличие функциональной связи между анализируемыми характеристиками), но в нашем случае очевидна стохастическая (вероятностная) связь (т.е. одному значению первой переменной соответствует некоторое значение второй переменной с определённой вероятностью). Во всех зонах $R > 0$, то есть – при возрастании одной величины другая тоже возрастает – это прямая зависимость.

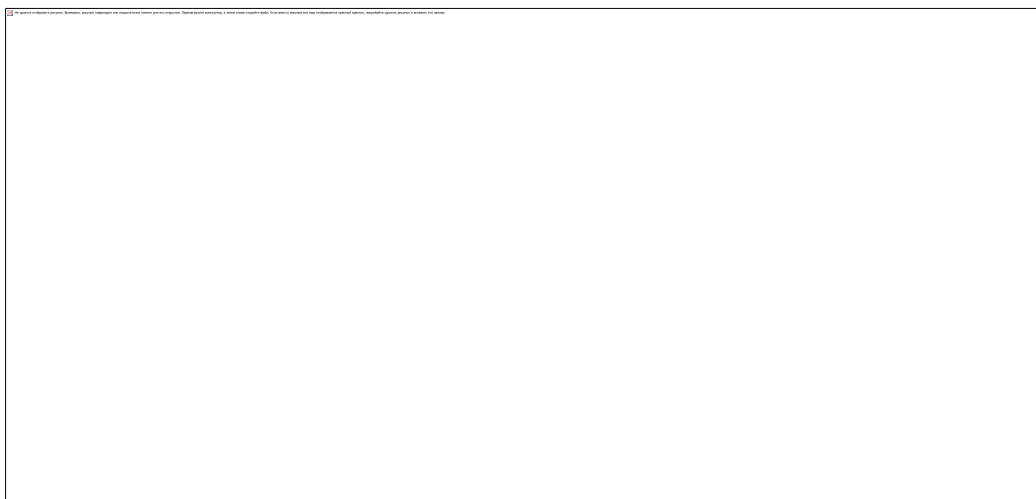


Рисунок 8 – Меридиональное распределение коэффициента корреляции модели $VA = a_0 + a_1 \cdot TB$

Оценка значимости коэффициентов корреляции R также была проведена для каждой широтной зоны. Для этого в каждом случае сформулирована нулевая гипотеза $H_0: r = 0$ и альтернативная $H_1: r \neq 0$. Проверка гипотезы осуществлена при помощи критерия Стьюдента с уровнем значимости $0,05$ $t_{кр} \approx 2,023$. Для всех широтных зон рассчитали $t^* = \frac{R}{\sigma_R}$ (табл. 9) Во всех широтных зонах $t^* > t_{кр}$, значит, коэффициенты корреляции значимы для всех широтных зон. Можно сделать вывод, что между ВА и ТВ существует статистически значимая прямая связь.

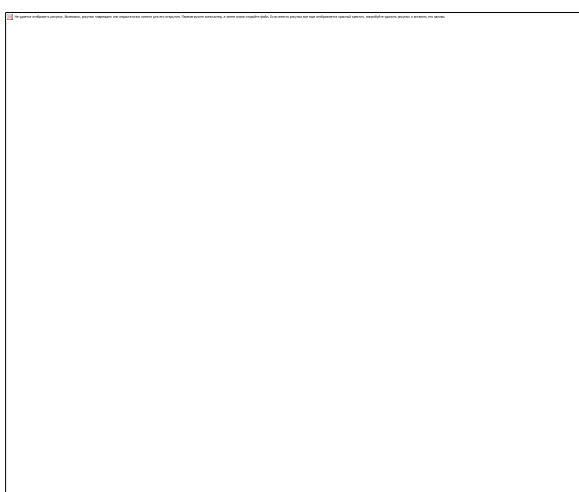


Рисунок 9 – График корреляционного поля характеристик ВА и ТВ

Также можно рассмотреть корреляционное поле средних значений ВА и ТВ. В декартовой системе координат отложим по оси абсцисс значения ТВ, а по оси ординат – значения ВА (рис. 9). По получившейся "эмпирической линии связи" тоже можно сделать выводы о наличии прямой стохастической зависимости между величинами.

Далее рассмотрим основные параметры модели линейной регрессии $BA = a_0 + a_1 * TB$. Угловым коэффициент a_1 – коэффициент регрессии – величина, показывающая, насколько в среднем изменится зависимая переменная при изменении факторной (независимой) переменной на единицу своего измерения.

Для каждой зоны были получены уравнения регрессии (табл. 8) и проведена оценка качества модели регрессии.

Таблица 9 – Параметры регрессионного анализа ВА и ТВ, уравнения моделей регрессии

Зона	$BA = a_0 + a_1 * TB$	R^2	R	t*	ta1	ta0
50-60° N	$9,938 + 0,849 * TB$	0,84	0,92	35,25	14,01	31,75
40-50° N	$5,589 + 1,334 * TB$	0,81	0,90	29,73	12,76	4,99
30-40° N	$-1,008 + 1,548 * TB$	0,74	0,86	20,30	10,29	-0,39
20-30° N	$-10,636 + 1,881 * TB$	0,67	0,82	15,29	8,72	-2,18
10-20° N	$-51,930 + 3,516 * TB$	0,59	0,77	11,89	7,47	-4,28
0-10° N	$-43,214 + 3,350 * TB$	0,60	0,78	12,16	7,58	-3,70
0-10° S	$-40,865 + 3,191 * TB$	0,54	0,73	9,83	6,61	-3,27
10-20° S	$-39,623 + 3,072 * TB$	0,66	0,81	14,86	8,57	-4,54
20-30° S	$-1,683 + 1,466 * TB$	0,38	0,62	6,29	4,87	-0,27
30-40° S	$7,095 + 1,001 * TB$	0,61	0,78	12,33	7,61	3,42
40-50° S	$9,281 + 0,795 * TB$	0,69	0,83	16,64	9,17	10,93
50-60° S	$8,671 + 0,755 * TB$	0,69	0,83	17,06	9,30	27,64

Оценка качества моделей регрессии проводилась по четырём характеристикам.

1. Оценка значимости коэффициентов регрессии a_0 и a_1 для каждой широтной зоны проведена при помощи критерия Стьюдента при $t_{кр} = 2,02$. Для каждого из коэффициентов регрессии были выдвинуты две гипотезы – нулевая гипотеза $H_0: a_1 = 0$ и альтернативная гипотеза $H_1: a_1 \neq 0$ для a_1 , и $H_0: a_0 = 0$, $H_1: a_0 \neq 0$ – для a_0 . При $|t_{a_0}| > t_{кр}$ и $|t_{a_1}| > t_{кр}$ соответствующие коэффициенты значимы. В таблице 8 приведена в том числе и t-статистика a_0 и a_1 . Можно проследить, что коэффициенты при переменной значимы во всех широтных зонах, а коэффициенты свободного члена значимы везде кроме зон 30-40° N и 20-30° S (Значимость коэффициента означает, что он отклоняется от нуля неслучайным образом.)

2. Значения коэффициентов детерминации R^2 (табл.8) показали, что ТВ определяется в основном от 54 до 84 % изменчивости ВА (за исключением зоны 20-30° S, где этот показатель равен 38%). Также можно увидеть, что в большинстве случаев $R^2 < 0,7$ данных о ТВ не вполне достаточно для описания изменчивости ВА.

3. Оценки стандартной ошибки модели (табл. 10) показывают, что практически во всех зонах (кроме 20-30° S) стандартная ошибка модели меньше 0,67 от стандартного отклонения ряда ВА, а в указанной зоне стандартная ошибка модели меньше 0,8 от стандартного отклонения ряда ВА. Это говорит о достаточно высокой точности воспроизведения межгодовой изменчивости ВА.

4. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна. При $F_{кр} = 4,1$ для всех широтных зон $F > F_{кр}$ (табл. 11), следовательно, согласно критерию Фишера регрессионные модели адекватны.

Таблица 10 – Расчёт значений стандартных ошибок модели $BA = a_0 + a_1 \cdot TB$ и долей стандартного отклонения ряда BA

Зона	Ст. ош. модели, кг/м2	СКО σ BA, кг/м2	$0,8 \cdot \sigma$ BA, кг/м2	$0,67 \cdot \sigma$ BA, кг/м2
50-60° N	0,15	0,37	0,30	0,25
40-50° N	0,18	0,41	0,33	0,27
30-40° N	0,24	0,45	0,36	0,30
20-30° N	0,28	0,47	0,38	0,32
10-20° N	0,48	0,74	0,59	0,50
0-10° N	0,55	0,87	0,69	0,58
0-10° S	0,60	0,87	0,70	0,58
10-20° S	0,34	0,58	0,46	0,39
20-30° S	0,28	0,35	0,28	0,23
30-40° S	0,16	0,25	0,20	0,17
40-50° S	0,12	0,22	0,17	0,14
50-60° S	0,09	0,16	0,12	0,10

Таблица 11 – Значения F-критерия моделей в каждой широтной зоне

Зона	F-критерий
50-60° N	196
40-50° N	163
30-40° N	106
20-30° N	76
10-20° N	56
0-10° N	57
0-10° S	44
10-20° S	73
20-30° S	24
30-40° S	58
40-50° S	84
50-60° S	87

Оценка значимости коэффициентов регрессии, коэффициентов детерминации R^2 , стандартной ошибки модели и адекватности модели по критерию Фишера показывают, что полученные модели линейной регрессии в целом могут считаться качественными.

Используя полученные модели, рассчитаем для каждой широтной зоны изменения ВА при повышении ТВ на один градус (табл. 12). Из таблицы 12 видно, что – согласно нашим моделям – при повышении температуры воздуха на один градус происходит повышение значений влагосодержания атмосферы на 4,4 – 9,1% в различных широтных зонах.

Таблица 12 – Расчёт изменения значений ВА при изменении ТВ на один градус

Зона	$BA = a_0 + a_1 \cdot TB$	$\Delta BA, \text{ кг/м}^2$	$\Delta BA/BA \text{ ср, \%}$
50-60° N	$9,938 + 0,849 \cdot TB$	0,71	4,93
40-50° N	$5,589 + 1,334 \cdot TB$	1,33	6,71
30-40° N	$-1,008 + 1,548 \cdot TB$	1,55	5,97
20-30° N	$-10,636 + 1,881 \cdot TB$	1,88	5,90
10-20° N	$-51,930 + 3,516 \cdot TB$	3,52	9,06
0-10° N	$-43,214 + 3,350 \cdot TB$	3,35	7,39
0-10° S	$-40,865 + 3,191 \cdot TB$	3,19	7,62
10-20° S	$-39,623 + 3,072 \cdot TB$	3,07	8,73
20-30° S	$-1,683 + 1,466 \cdot TB$	1,47	5,09
30-40° S	$7,095 + 1,001 \cdot TB$	1,00	4,37
40-50° S	$9,281 + 0,795 \cdot TB$	0,80	4,66
50-60° S	$8,671 + 0,755 \cdot TB$	0,76	6,52

В главе 1 мы упомянули мнение экспертов МГЭИК по поводу влияния водяного пара в атмосфере на рост ТВ, заключающееся в том, что водяной пар является исключительно следствием повышения ТВ. В этом утверждении эксперты опираются на уравнение Клаузиуса-Клапейрона, связывающее насыщающую упругость водяного пара с температурой воздуха: при

повышении средней глобальной температуры воздуха (14°C) на один градус, насыщающая упругость водяного пара повышается на 6,5%. Авторы [9] обращают внимание на то, что уравнение Клаузиуса-Клапейрона – термодинамическое, и его не стоит использовать для описания реальной атмосферы, а также утверждают, что не может быть одностороннего влияния температуры воздуха на влагосодержание атмосферы. Авторы подчёркивают, что «изменения TPW в соответствии с уравнением глобального атмосферного баланса влаги определяются разностью глобальных величин испарения и осадков или, в первом приближении, разностью испарения и осадков над Мировым океаном» [9].

Уравнение водного баланса атмосферы рассматривается в работе [11]

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}F = E - P \quad (14),$$

где W – влагосодержание атмосферы; F – вертикально-интегрированный горизонтальный полный поток водяного пара; $(E - P)$ – эффективное испарение; $\text{div}F$ – разность между выносом атмосферной влаги за пределы рассматриваемой территории и её вносом вглубь этой территории (так интерпретируется эта величина, опираясь на теорему Остроградского-Гаусса). Если рассматривать Мировой океан в целом, то $\text{div}F$ – результирующий вынос водяного пара с океана на континенты, а при осреднении уравнения для земного шара $\text{div}F = 0$. Тогда изменения влагосодержания атмосферы определяются только разностью испарения и осадков или, в первом приближении, разностью испарения и осадков над Мировым океаном. [11]

Из вышесказанного и наших расчётов следует, что повышение ВА происходит с ростом температуры по-разному в каждой широтной зоне. Таким образом, увеличение концентрации водяного пара нельзя определённо назвать следствием повышения температуры воздуха, как нельзя и определить направление очевидной положительной связи между ТВ и ВА.

Помимо этих двух характеристик формирование климата Земли обуславливается и другими крупномасштабными факторами, точнее их взаимодействием, то есть – положительными и отрицательными связями между температурой воздуха, влагосодержанием атмосферы, эффективным испарением, теплосодержанием океана, концентрацией углекислого газа, колебаниями уровня Мирового океана и т. п.

Заключение

В данной работе мы проанализировали меридиональное распределение ($50-60^\circ$ с.ш. – $50-60^\circ$ ю.ш.) и межгодовую изменчивость величин температуры воздуха и влагосодержания атмосферы; рассчитали тренды обеих характеристик, построили регрессионные модели для каждой широтной зоны.

Малые коэффициенты вариации свидетельствуют о малой степени изменчивости характеристик в исследуемой выборке. Коэффициенты асимметрии (A_s) и эксцесса (E_x) показывают, что по большей части распределение исследуемых характеристик близко к нормальному.

Расчёт трендов временного ряда выявил наличие значимого положительного тренда в изменчивости обеих переменных. Корреляционный анализ продемонстрировал прямую стохастическую связь ТВ и ВА.

Наконец, множественная линейная регрессия – была использована для построения моделей зависимости ВА от ТВ. С использованием полученных моделей для каждой широтной зоны были рассчитаны изменения ВА при повышении ТВ на один градус и результаты показали, что повышение ВА происходит с ростом температуры по-разному – от 4,4% до 9,1% – что не соответствует строгой зависимости термодинамического уравнения Клаузиуса-Клапейрона (при повышении средней глобальной температуры воздуха (14°C) на один градус, насыщающая упругость водяного пара повышается на 6,5%).

Опираясь на наши расчёты и приведённые исследования, можно утверждать о существовании как минимум двух противоположных мнений о роли ВА в климате Земли. Взаимосвязь – безусловно присутствующая между влагосодержанием атмосферы, температурой воздуха и парниковым эффектом – анализируется и оценивается с радикально разных точек зрения.

Утверждение «влажносодержание атмосферы – климатообразующий фактор», обоснованное в работах [6], [9], [11] выглядит убедительным и в расчётах, и с точки зрения физики процессов, и своей политической непредвзятостью.

Исходя из исследований архивов реанализа [15], [22], [24], очевидно, что дискуссии возможны не только из политических мотивов, но и – банально – из-за больших расхождений в данных. В последние годы появилась возможность использовать для наблюдений спутники и другие дистанционные системы. Возможно, это станет шагом к «стандартизации» данных и нивелированию больших расхождений. У этого источника данных есть и свои особенности: довольно большие объёмы данных нужно хранить, распознавать, анализировать – да и накопить достаточно – прежде, чем можно будет опираться на них полноценно.

Изучение влагообмена системы «океан-атмосфера» сейчас ведётся активнее и разнообразнее, чем когда-либо, – контактными и дистанционными методами, с помощью реанализов и прогностических моделей. Возможно, отчасти поэтому роль влагообмена между океаном и атмосферой в изменении климата остаётся полем для дискуссий – как и степень влияния человека на влажносодержание атмосферы.

Использованная литература:

1. Клиге Р.К. Изменения глобального водообмена. — М.: «Наука», 1985. — 247 с. 6.
2. Малинин В.Н. Влагообмен в системе океан-атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1994. 197 с.
3. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2020. 424 с.
4. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2012. 260 с.
5. Чечкин С.А. Основы геофизики. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 288 с.
6. Малинин В.Н. Влагосодержание атмосферы и парниковый эффект // Общество. Среда. Развитие. 2014. №3. С. 139–145.
7. Малинин В.Н. Изменения уровня Мирового океана и климата // Учёные записки РГГМУ. 2015.
8. Малинин В.Н., Вайновский П.А., Меридиональная изменчивость параметров климатической системы Атлантического океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 269–291.
9. Малинин В.Н., Вайновский П.А. Тренды компонент влагообмена в системе «океан-атмосфера» в условиях глобального потепления по данным архива Reanalysis-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 9–25.
10. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3–11.
11. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Наумов Л.М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 243–251. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251.

12. Малинин В.Н., Шевчук О.И. Эвстатические колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях. // Изв. РГО, 2008, т. 140, вып. 4, с. 20–30.

13. Плахина И.Н., Махоткина Е.Л. Аэрозольно-радиационный форсинг в атмосфере. Обзор современных данных // Учёные записки РГГМУ, 2007.

14. Church J.A., White N.J. A 20th century acceleration in global sea-level rise. // Geophysical Res. Letters, 2006, vol. 33, no. 1. L01602.

15. Gutenstein M., Fennig K., Schröder M., Trent T., Bakan S., Roberts J.B., Robertson F.R., Intercomparison of freshwater fluxes over ocean and investigations into water budget closure, EGU, 2020, pp. 1–35.

16. IPCC. Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group I / eds. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums. Cambridge, N. Y., Melbourne: Cambridge University Press, 1990. 410 p.

17. Philander G.S., Why the ITCZ is mostly North of the equator // Journal of Climate 9(12):2958-2972, 1996.

18. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

19. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

20. Jevrejeva S., Grinsted A., Moore J.C., Holgate S. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. // J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, no. C9.C09012.
21. Schmidt G.A., Ruedy R.A., Miller R.L., Lacis A.A. Attribution of the present-day total greenhouse effect // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. D20. P. 2156–2202.
22. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Mackaro J. Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses // J. Clim. 2011. 24. P. 4907–4924.
23. Wild M., Folini D., Hakuba M.Z., Schär C., Seneviratne S.I., Kato S., Rutan D., Ammann C., Wood E.F., König-Langlo G., The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models, Climate Dynamics, 2015, Vol. 44, No. 11–12, pp. 3393–3429.
24. Yu L., Jin X., Josey S., Lee T., Kumar A., Wen C., Xue Y., The Global Ocean Water Cycle in Atmospheric Reanalysis, Satellite, and Ocean Salinity, J. Climate, 2017, Vol. 30, pp. 3829–3852, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0479.1.
25. Argo [Электронный ресурс]// Режим доступа: <https://argo.ucsd.edu/>
26. NASA [Электронный ресурс]// Режим доступа: <http://www.giss.nasa.gov/tools/modelE/>
27. NCEP NOAA [Электронный ресурс]// Режим доступа: http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/Reanalysis_Data/NCEP/NCEP2/monthly/gaussian_grid/dlwrf.
28. REMSS [Электронный ресурс]// Режим доступа: <https://www.remss.com/>
29. University of East Anglia [Электронный ресурс]// Режим доступа: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/t2024/>