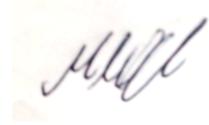


На правах рукописи



Аль Тамими Мутанна Абдулкарим

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА
ГЛОБАЛЬНОЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ АТМОСФЕРЫ И
ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСАДКОВ**

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2016

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики атмосферы (ЭФА) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

Научный руководитель:	Чукин Владимир Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра экспериментальной физики атмосферы, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеоро-логический университет»
Официальные оппоненты	Дергачев Валентин Андреевич доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией космических лучей, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» Фролькис Виктор Абрамович кандидат физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»
Ведущая организация	Государственный научный центр Российской Федерации «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт»

Защита диссертации состоится « 30 » июня 2016 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат диссертации разослан « 27 » мая 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

Л.В. Кашлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Настоящая диссертационная работа посвящена обоснованию и разработке метода моделирования вариаций параметров глобального гидрологического цикла на основе гелиогеофизических связей. Актуальность подобных исследований связана не только с практической ценностью долгосрочных прогнозов земного климата и выбора стратегии развития человечества, а также с научной ценностью выяснения физического механизма воздействия гелиоактивности на гидрологический цикл, с необходимостью изучения факторов и элементов глобального водообмена, перераспределяющего воды гидросферы между отдельными оболочками Земли. Разработанные модели и подходы эффективны при решении широкого класса задач в области атмосферного электричества, микрофизики облаков, физики атмосферы и математического моделирования глобальных изменений климата.

Несмотря на возросший в последние годы интерес к теме солнечно-земных связей, можно отметить скудость публикаций на тему влияния солнечной активности на элементы гидрологического цикла. Среди зарубежных и отечественных исследований особое значение представляют: оценка влияния гелиофакторов на количество облаков нижнего яруса, оптическую плотность облачности, количество осадков, повторяемость сильных засух, изменения потоков тепла с поверхностей океанов, изменения водности рек Центрального Федерального округа России, уровень Каспийского моря и сток реки Волга. Работ, посвященных колебаниям глобального испарения в результате воздействия солнечной активности, нами не обнаружено.

Предмет исследования

Предметом исследования настоящей работы являются глобальные параметры гидрологического цикла, полученные как по спутниковым измерениям, так и в численных экспериментах при различных значениях потенциала солнечной модуляции потока галактических космических лучей (ГКЛ).

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка статистической модели влияния солнечной активности на глобальные параметры гидрологического цикла.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выявление баз данных с многолетними рядами параметров солнечной активности и гидрологического цикла; оценка качества и надежности имеющихся спутниковых измерений и выяснение точности заключенной в них информации;
- количественный и качественный анализ связи и ее характера между солнечной активностью и гидрологическим циклом;

- поиск физического механизма, способного передавать солнечное воздействие на элементы гидрологического цикла;
- разработка методов моделирования и построение диагностической статистической математической модели;
- расчет баланса между скоростью испарения и количеством осадков по результатам численного моделирования климата;
- верификация построенной статистической модели;
- прогноз глобального влагосодержания, скорости испарения и интенсивности осадков на ближайшие годы.

Методы исследования и материалы

Основным методом, используемым в диссертационной работе, является численное моделирование на основе методов математической и статистической физики.

Основой работы явились глобальные архивы гидрометеорологических данных, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет: данные о влагосодержании атмосферы и параметрах облаков проекта ISCCP, данные о скорости испарения и количестве осадков проекта HOAPS, данные о количестве осадков проекта GPCP.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе спутниковых данных построена статистическая модель солнечно-земных связей, обеспечивающая минимальную ошибку восстановления элементов гидрологического цикла с достаточной для практических целей точностью;
2. Разработан количественный подход к измерению интенсивности гидрологического цикла и вариаций глобального влагосодержания атмосферы по значениям потенциала солнечной модуляции потока ГКЛ;
3. Выполнен прогноз глобального влагосодержания атмосферы, скорости испарения воды и интенсивности осадков на основе долгосрочного прогноза солнечной активности.

Теоретическая значимость работы

Построенная статистическая модель влияния солнечной активности на глобальные параметры гидрологического цикла обеспечивает оценку солнечно-земных связей на качественном и количественном уровнях. Найденная статистическая связь между потенциалом солнечной модуляции потока ГКЛ и влагосодержанием атмосферы полностью объясняет обнаруженную ранее положительную корреляцию между потоком ГКЛ и количеством облаков нижнего яруса, и отрицательную для облаков среднего и верхнего ярусов.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные подходы и модели могут применяться для решения широкого класса задач в области атмосферного электричества, мониторинга солнечной активности, аэрозольной микрофизики, а также математическом моделировании глобальных изменений климата.

Разработанная модель может быть полезна для диагностики и прогноза глобальных параметров гидрологического цикла, с целью планирования деятельности в области сельского хозяйства, водных ресурсов, строительства и многих других.

Результаты модели, представляющие собой средние по земному шару значения, могут быть использованы в качестве входных параметров моделей оценки изменений гидрологического режима регионального масштаба.

Отдельные результаты диссертационной работы используются в учебном процессе.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обусловлена использованием стандартных, опробованных, и протестированных методов и процедур, большим объемом проведенных численных экспериментов по исследованию влияния солнечной активности на параметры гидрологического цикла, и подтверждается согласием с экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Результаты исследований влияния солнечной активности, характеризуемой потенциалом солнечной модуляции потока ГКЛ, на влагосодержание атмосферы и интенсивность осадков;
- Гипотеза, объясняющая электрический механизм солнечно-земных климатических связей;
- Результаты прогнозирования глобального влагосодержания атмосферы на основе долгосрочного прогноза солнечной активности.

Апробация результатов

Основные положения и отдельные результаты исследования обсуждались на ежегодных конференциях Европейского метеорологического общества (Прага, 2014; София, 2015), Всероссийской конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2014» (Пулково, 2014), итоговых сессиях Ученого совета РГГМУ (Санкт-Петербург, 2015, 2016), Международной конференции «Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата» (Минск, 2015).

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 печатных работах, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем

Материал диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 135 страниц, включает 55 рисунков и 7 таблиц, 1 приложение. Список использованных источников содержит 143 наименования.

Содержание диссертационной работы

Во введении обосновывается актуальность темы, кратко освещается современное состояние проблемы, определяются задачи и цель работы, описывается структура диссертации и формулируются общие подходы к решению поставленных задач.

Первая глава посвящен вопросам передачи солнечного воздействия на земную климатическую систему в целом и гидрологический цикл в частности.

Раздел 1.1 содержит обзор современных представлений о механизме солнечной активности и количественных параметрах ее оценки. Отмечено, что в виду сложности описываемых явлений, обусловленных взаимодействием многих конкурирующих процессов, события солнечной активности характеризуют в большинстве случаев не физическими параметрами, а индексами активности, которые эмпирически обобщают и упрощают информацию о процессе, но вместе с тем сохраняют разумный уровень достоверности. Особое внимание уделено параметру, характеризующему уровень влияния солнечной активности на поток ГКЛ - потенциалу солнечной модуляции (ПСМ). Вариации потока ГКЛ находятся в противофазе с 11-летним циклом солнечной активности, т.е. снижение средней напряженности магнитного поля Солнца в периоды спада солнечной активности приводит к увеличению количества ГКЛ, воздействующих на околоземное пространство. Измерение энергетических спектров протонов и ядер гелия, составляющих ГКЛ, стало возможным с появлением в последнее время нейтронных мониторов.

Раздел 1.2 содержит классификацию механизмов влияния солнечной активности на атмосферу Земли. Отмечено, что многообразие проявлений солнечно-земных связей, по-видимому, обусловлено действием нескольких одновременно действующих механизмов влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы, имеющих различное пространственно-временное разрешение. Их совместное действие может иметь как синергетический, так и компенсирующий эффект.

Предложен механизм опосредованного солнечно-космического влияния на климато-гидрологический режим Земли, развитый далее в третьей главе диссертационной работы.

Частицы галактических космических лучей образуют в межпланетном пространстве радиационное поле, меняющееся с изменением солнечной активности. Потоки частиц испытывают долговременные регулярные периодические колебания, достигая максимума в годы минимума солнечной активности, когда число солнечных пятен $RI \approx 10-20$, и минимума в годы максимума с $RI > 120-180$. Галактические космические лучи изменяют скорость ионизации атмосферы, тем самым модулируя ее электрическое сопротивление, что подтверждает рисунок 1, на котором синхронное увеличение плотности потока ГКЛ и тока проводимости атмосферы соответствуют периодам минимальной активности Солнца (1976-1977 гг.).

При увеличении потока ГКЛ на 50% плотность электрического заряда на поверхности океана увеличивается примерно на 8%. Поскольку морская вода является электролитом, то плотность поверхностного заряда влияет на распределение ионов Na^+ и Cl^- в поверхностном слое воды, что сопровождается изменениями значения активности воды, которая наряду с

температурой и влагозапасом атмосферы является определяющим фактором скорости испарения E .

Изменение скорости испарения сопровождается вариациями содержания водяного пара, водозапаса, альбедо и высоты верхней границы облаков, прозрачности атмосферы, интенсивности осадков и, как следствие, приземной температуры воздуха. Изменением влагозапаса, в свою очередь, может быть объяснена зависимость потока ГКЛ и количества облаков, причем между ГКЛ и количеством облаков нижнего яруса наблюдается высокая положительная корреляция, среднего и верхнего ярусов - отрицательная. Все это приводит к изменению радиационного баланса системы земная поверхность-атмосфера и, в результате, к изменению климата планеты.

Таким образом, можно предложить следующую цепочку причинно-следственных связей, объясняющих влияние солнечной активности на атмосферные процессы: Солнечная активность \rightarrow Поток ГКЛ \rightarrow Электрическая проводимость воздуха \rightarrow Плотность поверхностного заряда \rightarrow Активность воды \rightarrow Испарение \rightarrow Гидрологический цикл (количество облаков, осадки, сток рек, уровень морей).

В результате, имеется тесная связь между важным элементом гидрологического цикла — испарением с Мирового океана и потоком ГКЛ, который модулируется солнечным ветром, то есть зависит от солнечной активности. Это позволяет по-новому взглянуть на физический механизм солнечно-земных связей: космическое воздействие осуществляется непосредственно на подстилающую поверхность и затем распространяется на вышележащие слои атмосферы.

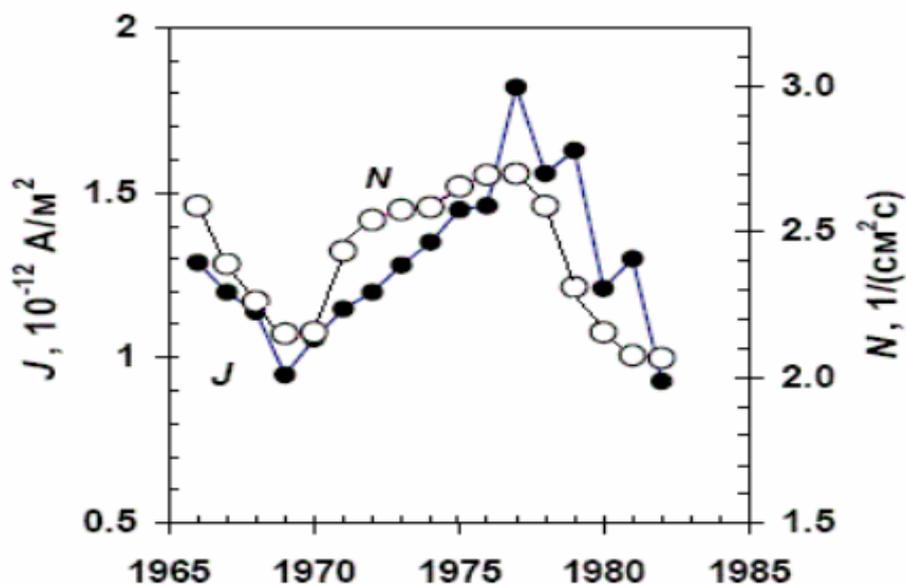


Рисунок 1 - Зависимости величины плотности атмосферного тока J (темные кружки) и потока космических лучей N на средних широтах на высоте $h \approx 22$ км (светлые кружки)

Раздел 1.3.1 посвящен анализу методов измерения испарения, являющегося звеном гидрологического цикла. Отмечено, что оценка скорости испарения крайне важна для понимания гидрологического цикла и изучения процессов в климатической системе, однако этот параметр определяется существующими методами зондирования атмосферы с точностью лишь около 20%.

Вторая глава посвящена обзору международных проектов усвоения, хранения и обработки метеорологических данных, определены их точность и надежность с целью использования в статистических математических расчетах настоящей работы.

Раздел 2.1 содержит хронологическое рассмотрение космических аппаратов, представляющих собой основной источник данных о солнечной активности. Даны адреса информационных баз данных по солнечно-земным связям, находящихся в свободном доступе в сети Интернет.

Раздел 2.2 посвящен проекту спутниковых наблюдений International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), включающему систему сбора спутниковых измерений в видимой и инфракрасной областях спектра и определение на их основе глобального распределения облаков, суточных, сезонных и межгодовых вариаций их количеств и свойств. Рассмотрена структура ISCCP, представлены среднегодовые значения облачности для Северного и Южного полушарий над разными типами поверхностей. Наиболее востребованы для использования данные ISCCP уровня D2 – среднемесячные значения характеристик облачности на регулярной сетке $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, погрешность которых не превышает 5%. Помимо количества облачности, в проекте ISCCP восстанавливаются значения высот верхней границы облачности, оптической толщины, давления на верхней границе облачности, а также влагосодержания атмосферы.

Раздел 2.3 посвящен единственной общедоступной системе спутниковых данных, предоставляющих глобальные значения испарения и осадков и, следовательно, потоков пресной воды на период 1987-2005 гг. - проекту HOAPS. HOAPS включает три архива. HOAPS-G содержит осредненные в узлах регулярной сетки с шагом 0.5° ежемесячные данные по измерениям микроволнового сканера SSM/I со всех доступных за время наблюдения спутников. Данные в архиве HOAPS-C имеют более высокое временное и сниженное пространственное разрешение. Каждая ячейка регулярной сетки с шагом в 1° включает измерения двух ежедневных пролетов спутника. HOAPS-S содержит все восстановленные физические параметры с исходным разрешением сканера SSM/I отдельно по каждому спутнику.

Раздел 2.4 посвящен наиболее надежному Международному проекту по климатологии осадков GPCP, поскольку он включает не только спутниковые данные, но и данные более чем 6000 наземных станций. Вычисление среднегодовых значений глобальной интенсивности осадков

выполнено в узлах регулярной сетки $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ за период 1979-2000 гг., а также в сетке $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ за период 1997-2000 гг.

В разделе 2.5 рассмотрена структура глобальной крупномасштабной модели промежуточной сложности «Planet Simulator», разработанной в Метеорологическом институте Гамбургского университета для проведения численных экспериментов по динамике климата на Земле и схожих с ней планетах Солнечной системы. С помощью модели климата Planet Simulator в диссертационной работе проводилось численное моделирование параметров гидрологического цикла.

Результаты обработки данных проекта по спутниковой климатологии облаков ISCCP, представленные на рисунке 2, подтвердили наличие положительной корреляции между потоком ГКЛ и содержанием водяного пара в атмосфере.

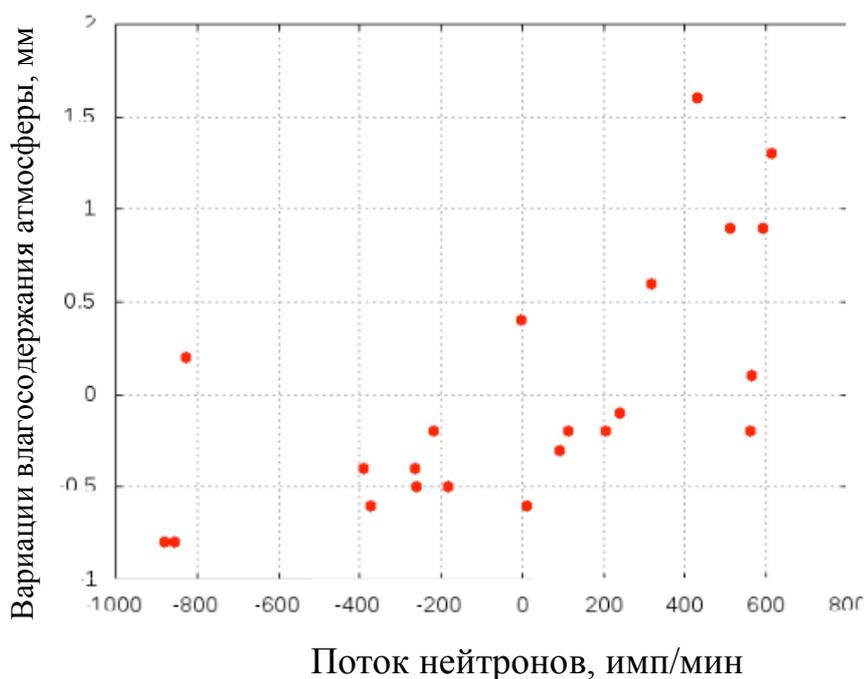


Рисунок 2 - Зависимость влагозапаса атмосферы от вариаций потока ГКЛ

С помощью численной модели Planet Simulator за десятилетний период получен временной ход скорости испарения и интенсивности осадков, представленный на рисунке 3. Следует отметить равенство значений скорости испарения и интенсивности осадков, следовательно, в среднем сумма скоростей испарения и выпадения осадков близка к нулю.

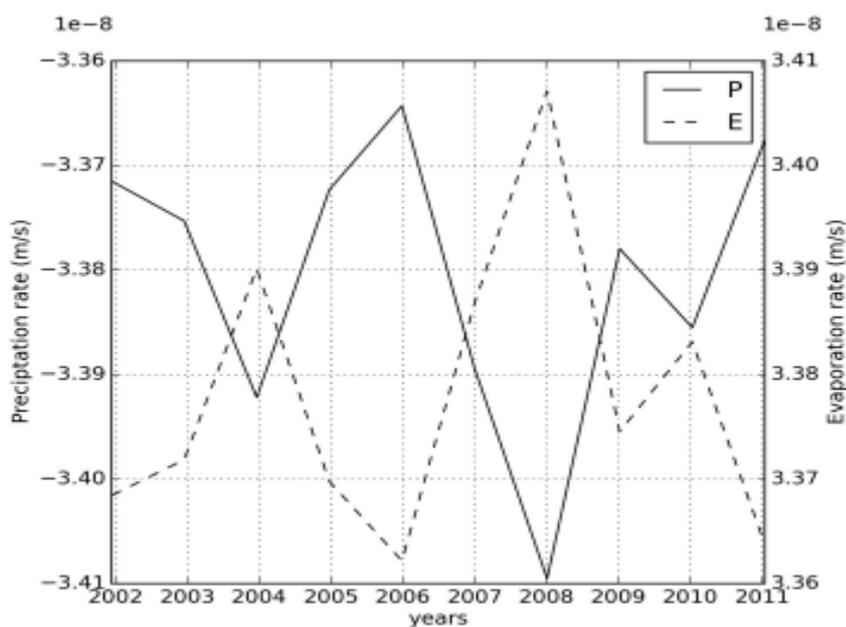


Рисунок 3 – Динамика скорости испарения и интенсивности осадков, полученные по численной модели Planet Simulator

На рисунке 4 представлены оценки среднегодового испарения как функция ПСМ за период с 1983 по 2008 гг., Как следует из графика на рисунке 4, между испарением и ПСМ наблюдается высокая отрицательная корреляция с коэффициентом -0.73 ± 0.26 .

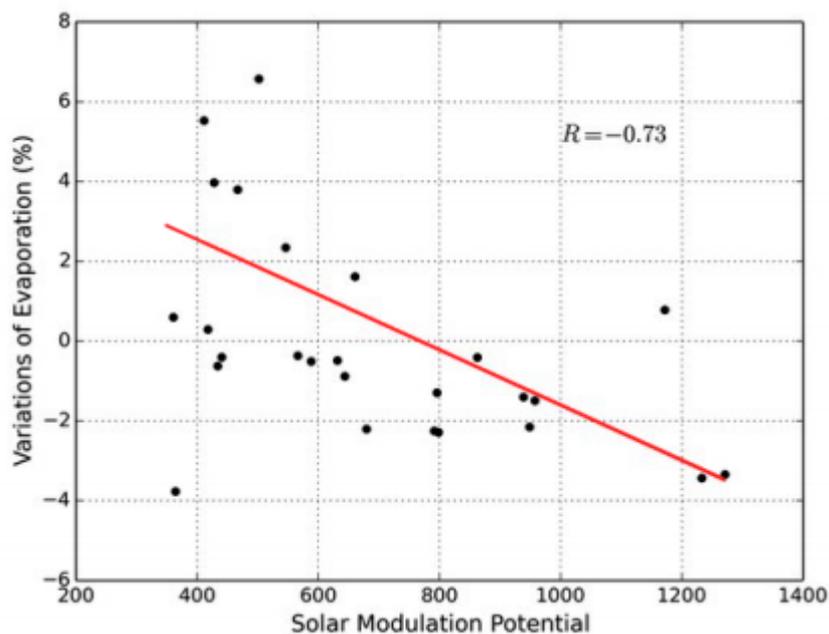


Рисунок 4 – Оценка вариаций среднегодового испарения как функция среднегодовых значений ПСМ.

Раздел 2.6 содержит информацию о структуре двоичного формата NetCDF, используемого для обмена научными данными. Формат и интерфейс NetCDF обеспечивает хранение и обработку данных больших объемов в переносимом и самоопределяемом виде. Рассмотрены программы

визуализации и обработки данных формата NetCDF, созданные к настоящему времени.

Третья глава посвящена исследованию связей вариаций солнечной активности и параметров гидрологического цикла.

В **разделе 3.1** представлена статистическая модель влияния солнечной активности на параметры гидрологического цикла.

Расчет потенциала солнечной модуляции основывался на данных измерений чисел Вольфа по упрощенной методике Р.А.Нуммик:

$$\Psi = 370 + 0.3(RI_{12}\Delta t)^{1.445} \quad (1)$$

где Ψ - потенциал солнечной модуляции ГКЛ, МэВ; $RI_{12}(\Delta t)$ - скользящее среднегодовое значение числа солнечных пятен RI_{12} , сдвинутое на Δt месяцев назад.

Временной сдвиг Δt в формуле (1) вызван запаздыванием вариаций потока ГКЛ относительно колебаний уровня солнечной активности. Данный эффект гистерезиса характеризует инерционность физических условий в гелиосфере и имеет разную величину в четных и нечетных циклах солнечной активности.

В настоящей работе выполнена оценка значения Δt путем проведения серии численных экспериментов по расчету ПСМ по формуле (1) при значениях задержки Δt от 0 до 48 месяцев. Наибольшая корреляция между рассчитанными и экспериментальными данными получена при временном сдвиге, равном 5 месяцам, и оказалась равной 0.82 ± 0.10 .

Расчет временного хода значений потенциала солнечной модуляции при $\Delta t = 5$, результаты которого представлены на рисунке 5, производился на основе измеренных значений числа солнечных пятен на период с 01.1749 по 05.2015 г. Также были получены будущие значения ПСМ на основе прогноза числа солнечных пятен, выполненных Д. Хатавеем (David Hathaway) до 12.2019 г. Для сравнения на рисунке приведены значения ПСМ за период с 07.1936 по 12.2009 г., основанные на данных измерений. На рисунке 6 представлена гистограмма распределения разностей вычисленных и измеренных среднегодовых значений ПСМ за период с 1937 по 2009 г.

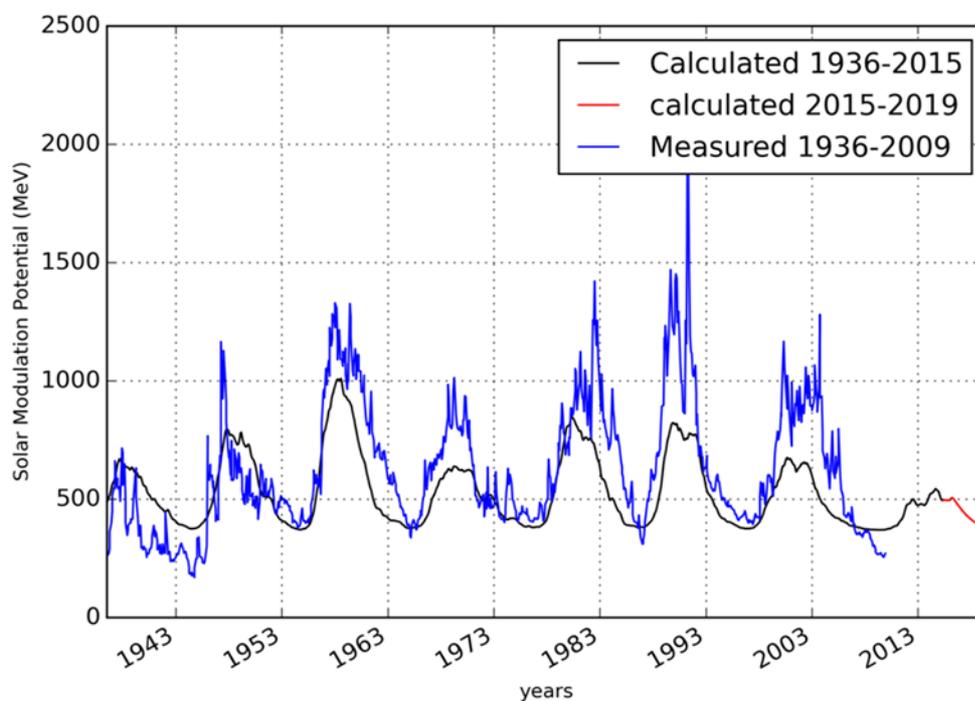


Рисунок 5 - Динамика значений ПСМ, вычисленных в настоящей работе в сравнении с данными измерений

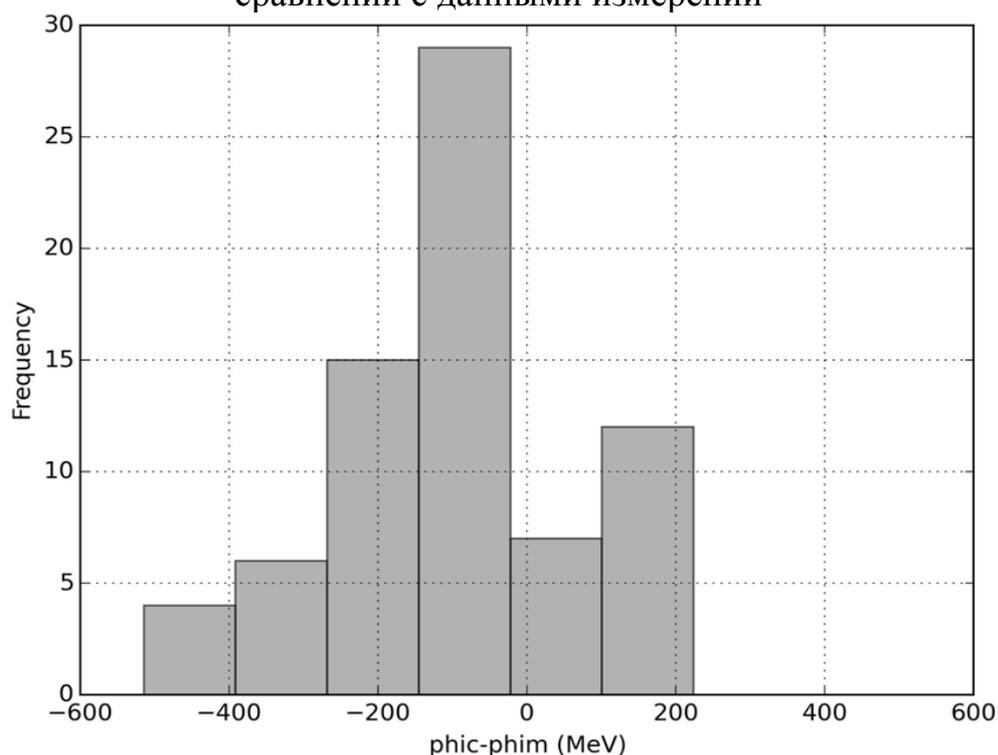


Рисунок 6 - Гистограмма распределения разностей вычисленных и измеренных среднегодовых значений ПСМ за период с 1937 по 2009 г.

Мерой массового содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения является влагосодержание атмосферы (PWV). Этот параметр определяется интегрированием по высоте парциального давления водяного пара, которое в свою очередь пропорционально концентрации молекул водяного пара. Для построения зависимости PWV от

ПСМ были использованы среднемесячные значения данных глобального распределения влагосодержания атмосферы проекта ISCCP за период с 1984 по 2009 гг. На рисунке 7 представлена диаграмма, содержащая значения вариаций ΔPWV и рассчитанные значения ПСМ за период исследования. Через точки проведена линия тренда, уравнение которой имеет вид:

$$\Delta PWV = b \cdot \Psi + a \quad (2)$$

где ΔPWV - отклонения от тренда содержания водяного пара, мм; Ψ - потенциал солнечной модуляции, МэВ; a и b – коэффициенты аппроксимации.

Определенные на основе метода наименьших квадратов значения коэффициентов аппроксимации оказались равными $a = 0.79 \pm 0.28$, $b = -0.0012 \pm 0.0001$.

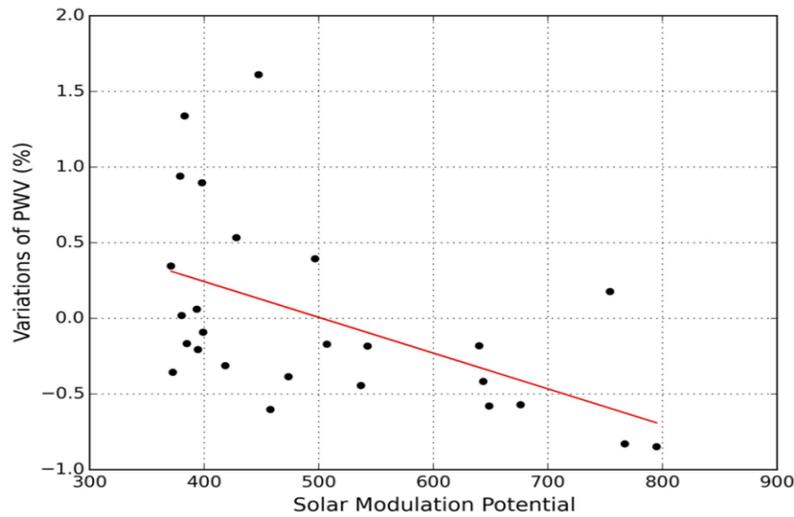


Рисунок 7 - Зависимость вариаций ΔPWV от значений ПСМ за период с 1984 по 2009 г.

Затем на основе спутниковых данных проекта ISCCP вычислены месячные значения интегрального содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы PWV , осредненные по узлам сетки с шагом $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, представленные на рисунке 8.

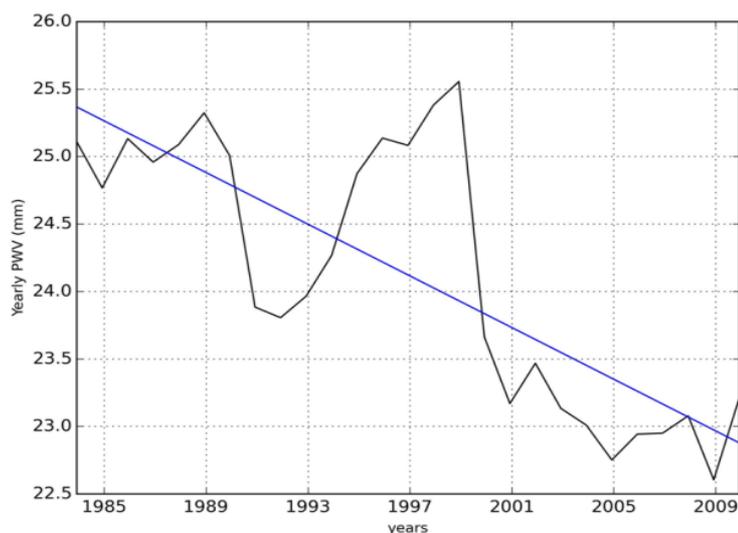


Рисунок 8 - Динамика интегрального влагосодержания в вертикальном столбе атмосферы по данным проекта ISCCP

По полученным данным определены параметры линейного тренда временного хода среднегодовых значений PWV , что позволило экстраполировать значения PWV на период до 2019 г. Путем сложения значений PWV и отклонений из формулы (2) получен массив значений содержания водяного пара PWV на период с 1936 по 2019 г., который представлен в виде временного хода на рисунке 9.

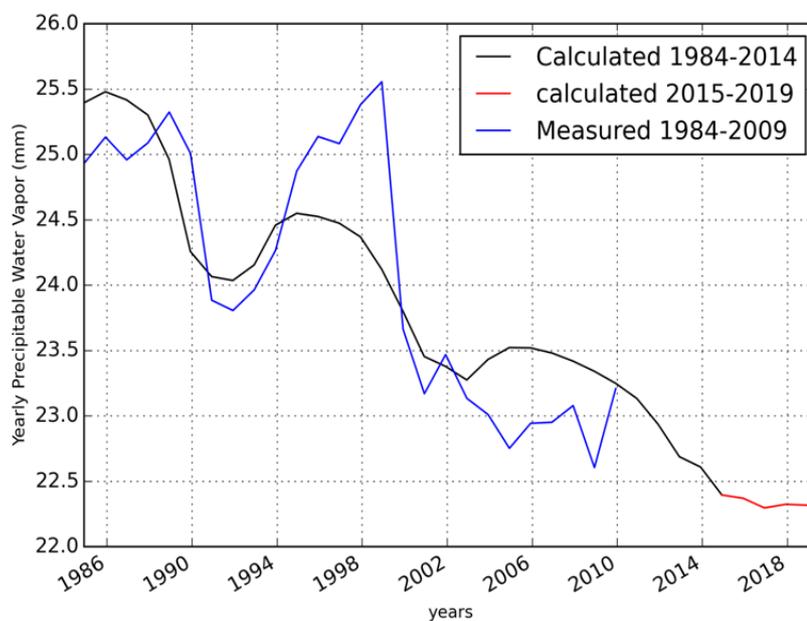


Рисунок 9 - Динамика влагосодержания по данным проекта ISCCP с 1984 по 2009 г. и рассчитанные значения PWV , включая экстраполированные значения на период до 12.2019

Гистограмма разностей рассчитанных и измеренных среднегодовых значений PWV за период с 1984 по 2009 г., показанная на рисунке 10, представляет унимодальное распределение с положительной асимметрией.

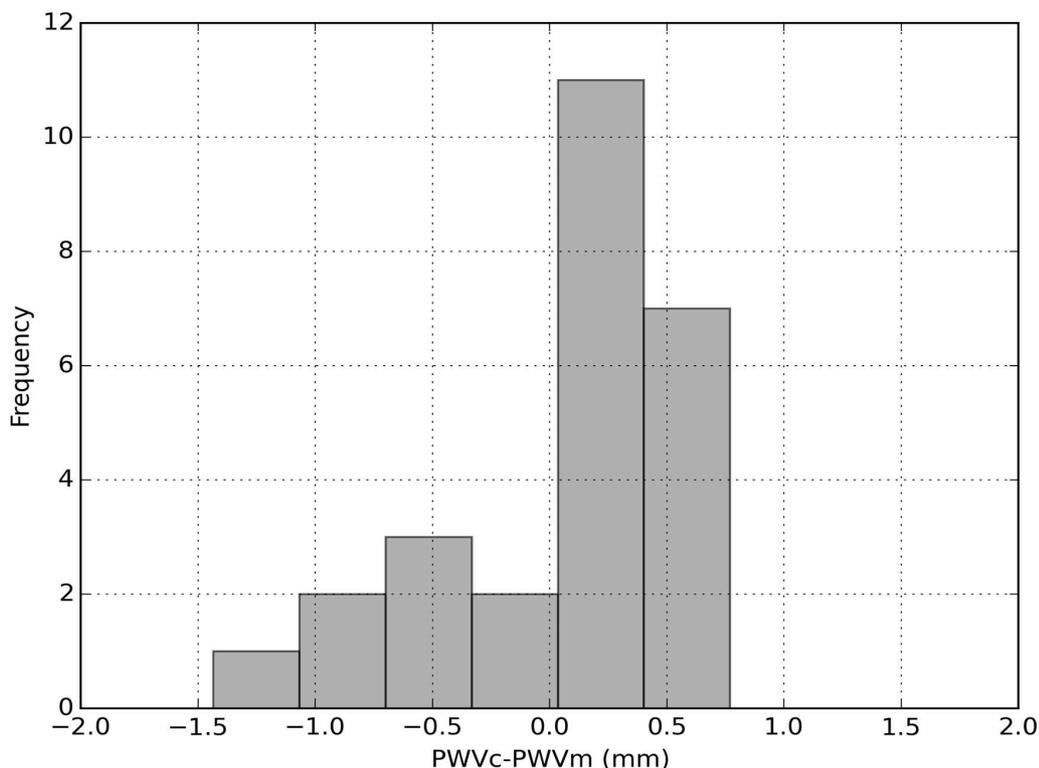


Рисунок 10 - Гистограмма распределения разностей вычисленных и измеренных среднегодовых значений PWV за период с 1937 по 2009 г.

Разработанный в настоящей работе подход для определения глобального испарения основан на использовании данных о влагосодержании атмосферы, определяемых по спутниковым измерениям.

Эмпирическое соотношение между среднегодовыми глобальными значениями скорости испарения и влагосодержания атмосферы имеет вид:

$$E = c \cdot PWV, \quad (3)$$

где E — скорость испарения, PWV — влагосодержание атмосферы, c — эмпирический коэффициент, определяемый как отношение между количеством выпавших за год осадков к среднему за год влагосодержанию атмосферы.

Данное соотношение получено в предположении равенства значений испарения и осадков за год, осредненных по всему земному шару, так как иное привело бы к изменению глобального влагосодержания атмосферы, что подтверждается результатами осуществленного численного моделирования климата с помощью модели Planet Simulator.

Для определения значения эмпирического коэффициента c модели были использованы среднемесячные значения данных глобального распределения влагосодержания атмосферы проекта ISCCP и глобального

распределения количества осадков проекта GPCP за период с 1983 по 2003 гг. в узлах сетки $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. Временные ряды данных были разделены на две выборки: с 1983 по 1993 г. и с 1993 по 2003 г.

Первая выборка использовалась в качестве обучающей, вторая - в качестве контрольной, затем расчет повторялся со сменой выборок: вторая становилась обучающей, первая - контрольной.

В результате использования глобальных данных об осадках и влагосодержании атмосферы были получены два массива коэффициентов с эмпирической модели для каждой точки сетки размером 144×72 для периодов: 1983-1993 и 1993-2003 гг.

При определении глобальной скорости испарения с помощью предложенной модели для периода с 1983 по 1993 гг. использовалось значение коэффициента c модели, определенное по второй выборке, а при расчетах испарения в период с 1993 по 2003 гг. – по первой. Этот подход применен с целью избежать повторного использования данных о влагосодержании атмосферы.

Осредненное по всему земному шару значение коэффициента c за период с 1983 по 1993 г. оказалось равным 0.109, а за период с 1993 по 2003 г. равно 0.111. Таким образом, далее можно считать среднее глобальное значение коэффициента c не зависящим от времени и равным 0.11.

Методика вычисления осадков на основе влагосодержания PWV заключалась в следующем.

На основе данных измерений по осадкам проекта GPCP с 01.1979 по 10.2015 г. и данных по влагосодержанию проекта ISCCP с 1984 по 2009 г., отмеченных на графике рисунка 11, построена аппроксимационная прямая, которая имеет вид:

$$P = a + b \cdot \Delta PWV \quad (4)$$

где a и b – найденные коэффициенты, равные 2.680 ± 0.004 и 0.011 ± 0.007 , соответственно. Коэффициент корреляции между интенсивностью осадков, определенной по (4) и данными измерений оказался равным $r = 0.30 \pm 0.32$.

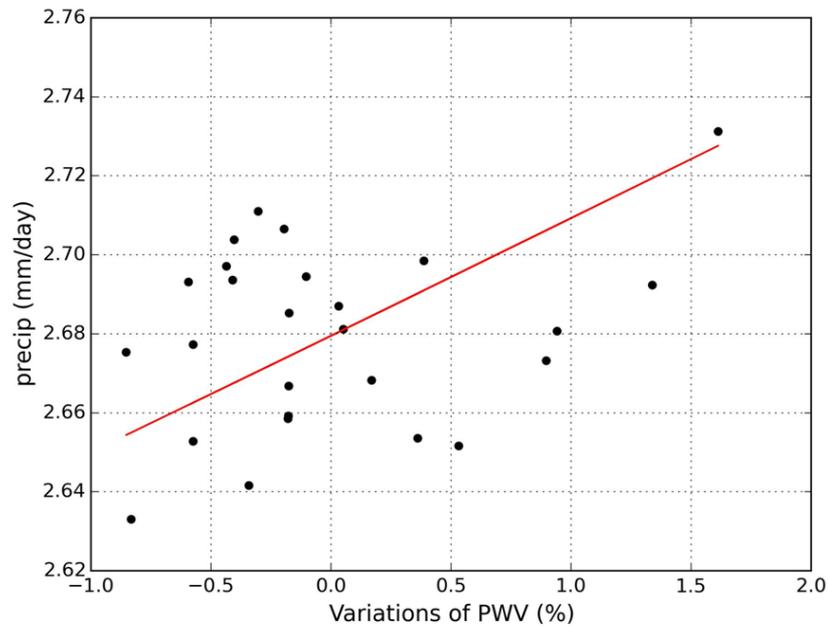


Рисунок 11 - Зависимость вариаций количества осадков и отклонений значений влагосодержания за период с 1984 по 2009 г.

Разделив интегральное по земному шару количество осадков на влагосодержание атмосферы за весь период исследования, получили следующее значение:

$$P/PWV = (0.110 \pm 0.007) \text{ сутки}^{-1} \quad (5)$$

Это число характеризует среднюю интенсивность ГДЦ (Water Cycle Rate, WCR). На рисунке 12 представлен ход интенсивности ГДЦ за период с 1983 по 2008 гг., значения которого вычислены на основе результатов численного моделирования по модели PlanetSimulator.

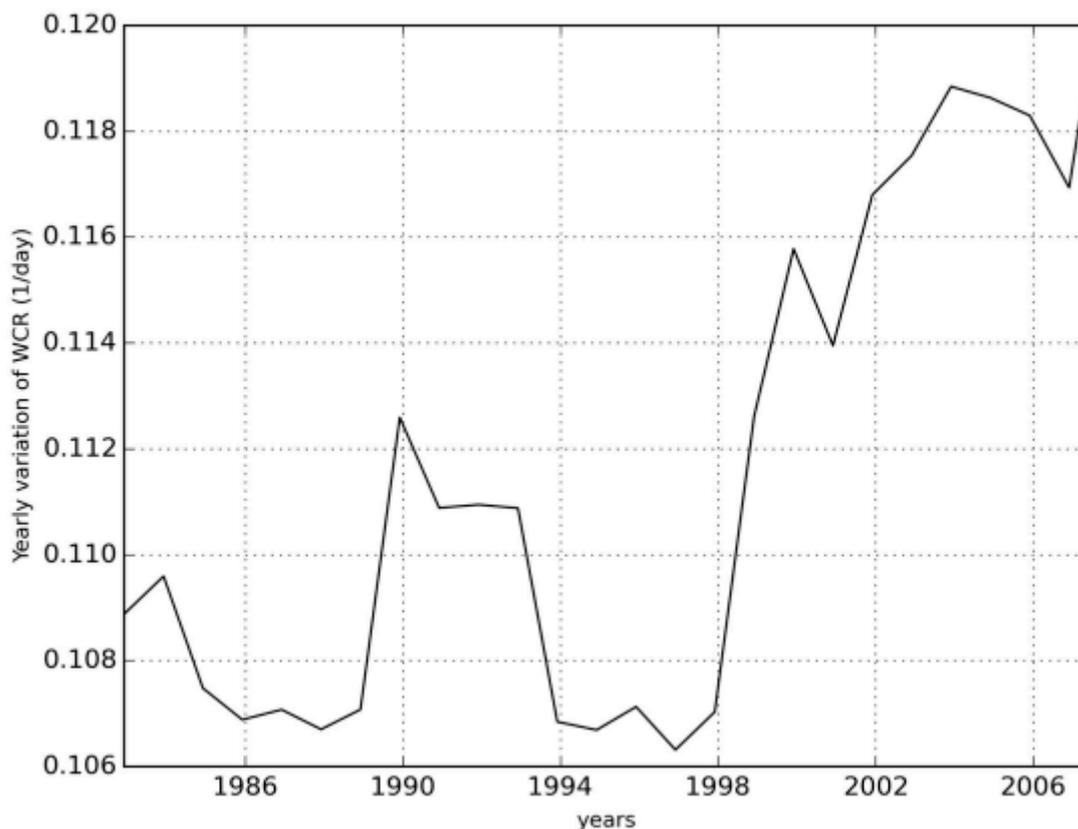


Рисунок 12 - Динамика интенсивности ГДЦ (сутки⁻¹) с 1983 по 2008 гг.

Раздел 3.2 посвящен верификации статистической модели связи влагосодержания атмосферы со скоростью испарения. Результаты расчетов скорости глобального испарения на основе спутниковых данных о влагосодержании атмосферы сопоставлены с данными о количестве осадков для двух периодов: 1983-1993 гг. и 1993-2003 гг.

Результаты сопоставления, представленные таблице 1, показывают, что относительная ошибка оценки испарения не превосходит 1.8%. На рисунке 13 представлена гистограмма распределения абсолютных ошибок оценок разности скорости испарения и интенсивности осадков ($P-E$), которая показывает незначительные различия параметров распределения (среднего значения и среднеквадратического отклонения) за периоды 1983-1993 гг. и 1993-2003 гг.

Таблица 1 — Результаты верификации статистической модели

Выборка	Период	C	E , мм/сутки	P , мм/сутки	$P-E$, мм/сутки
1	1983-1993	0.107	2.725	2.678	-0.047±0.285
2	1993-2003	0.111	2.646	2.685	0.039±0.292

На основе спрогнозированных значений числа солнечных пятен RI за период с 2015 по 12.2019 г. выполнен прогноз глобального количества осадков на период 2015-2019 гг., результаты которого представлены на рисунке 14. Кривые на рисунке 14 построены по следующим данным:

- значениям количества осадков проекта GPCP с 1979 по 2014 г.;
- рассчитанным по значениям влагосодержания PWV проекта ISCCP с 1983-2009 г.;
- рассчитанным по формулам (1-3, 5) за период с 1979 по 2014 г.;
- рассчитанным по формулам (1-3, 5) на основе спрогнозированных значений RI за период с 2015 по 12.2019 г.

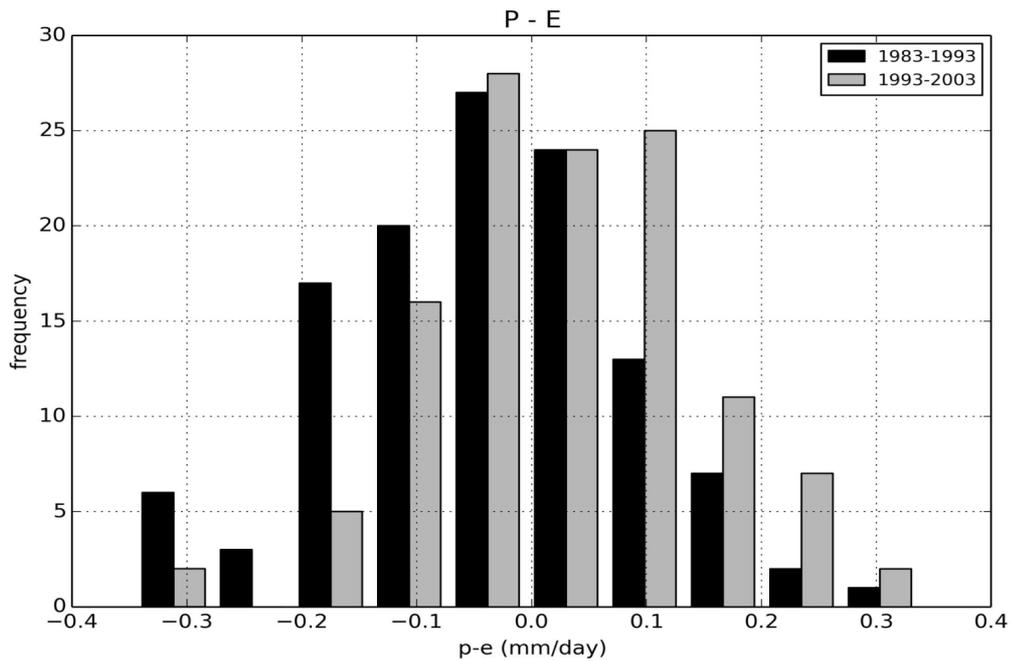


Рисунок 13 - Ошибки оценки глобального испарения по спутниковым данным о влагосодержании атмосферы

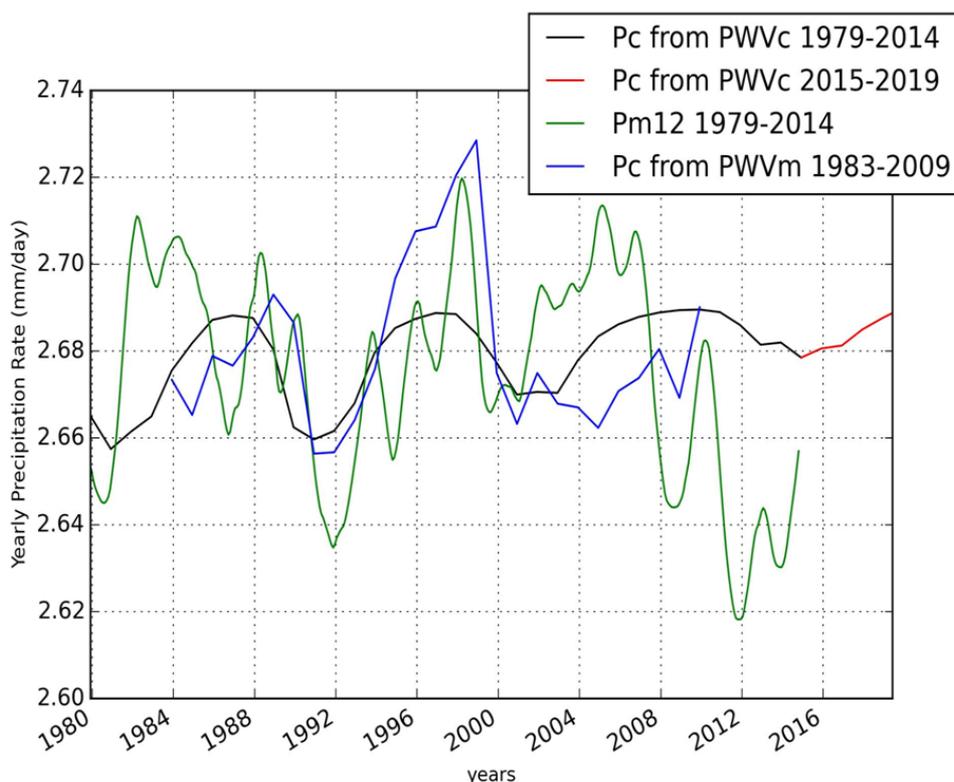


Рисунок 14 - Временной ход среднегодовых значений количества осадков

Прогноз среднегодовых значений потенциала солнечной модуляции, влагосодержания PWV и количества осадков P (испарения E) на период до 2019 г. представлен в таблице 2.

Таблица 2 - Прогноз среднегодовых значений ПСМ, влагосодержания и осадков/испарения

Год	Ψ , МэВ	PWV , мм	P , мм/сутки
2016	491	22.3	2.68
2017	439	22.3	2.69
2018	401	22.3	2.69
2019	385	22.3	2.69

Согласно полученным данным, уменьшение потенциала солнечной модуляции будет сопровождаться практически постоянным уровнем содержания водяного пара в атмосфере и незначительным увеличением осадков и испарения.

На рисунке 15 построена гистограмма разности рассчитанных и измеренных среднегодовых значений количества осадков за период с 1979 по 2014 г.

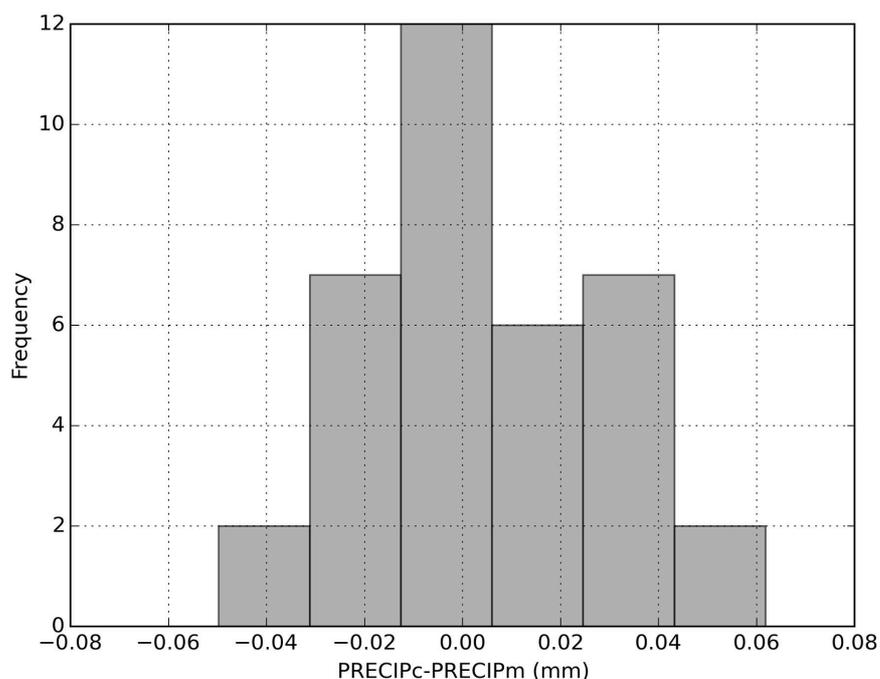


Рисунок 15 - Гистограмма разности рассчитанных и измеренных среднегодовых значений количества осадков за период с 1979 по 2014 г

Средние значения разностей рассчитанных и измеренных среднегодовых значений потенциала солнечной модуляции, влагосодержания и количества осадков, а также среднеквадратические отклонения этих разностей представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Среднегодовые значения разностей ПСМ, влагосодержания и осадков

Потенциал солнечной модуляции, МэВ (1937-2009 гг.)	Влагосодержание, мм (1984-2009 гг.)	Количество осадков, мм/сутки (1979-2014 гг.)
-90.30 ± 45.15	0.04 ± 0.024	0.004 ± 0.002

В Заключение приведены основные результаты работы и выводы.

Выполненный анализ механизмов передачи солнечного воздействия на земную климатическую систему в целом и гидрологический цикл в частности позволил предложить гипотезу, объясняющую механизм солнечно-земных климатических связей. Космическое воздействие потока ГКЛ, который модулируется солнечным ветром, т.е. зависит от солнечной активности, осуществляется непосредственно на подстилающую поверхность и затем распространяется на вышележащие слои атмосферы. Это меняет мнение об основной проблеме гелиоклиматологии, отмечаемой в многочисленных публикациях - недостаточности энергетики земных проявлений активности Солнца (магнитных бурь, потоков частиц и т.п.) для воздействия на

глобальную погоду и климат.

В результате выполненного обзора международных проектов усвоения, хранения и обработки метеорологических данных выявлены их особенности, структура, точность и надежность с целью использования в статистических математических расчетах настоящей работы.

Доказана тесная связь между содержанием водяного пара в атмосфере и потоком ГКЛ, характеризуемым потенциалом солнечной активности.

Коэффициент корреляции между средним по земному шару влагосодержанием и потенциалом солнечной модуляции равен -0.73 ± 0.26 .

Разработана методика вычисления глобального влагосодержания PWV по рассчитанным значениям потенциала солнечной модуляции, а также методика вычисления испарения и осадков на основе PWV.

Построенная статистическая модель солнечно-земных связей обеспечивает достаточную для практических целей точность восстановления влагосодержания атмосферы на основе данных о солнечной активности.

Разработанный количественный подход к определению интенсивности гидрологического цикла и вариаций глобального влагосодержания атмосферы позволил получить временной ход интенсивности ГДЦ за период с 1983 по 2008 гг. на основе результатов численного моделирования по модели Planet Simulator. Установлено среднее за период исследования значение интенсивности ГДЦ: (0.110 ± 0.007) сутки⁻¹.

Получен прогноз потенциала солнечной модуляции, глобального влагосодержания, испарения и осадков на 2016 – 2019 гг. Точность прогноза величины ПСМ зависит главным образом от точности предсказания числа солнечных пятен на прогнозируемый период солнечной активности.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, базы Web of Science и Scopus

1. **Аль-Тамими М.А.**, Чукин В.В. Параметризация глобального испарения на основе спутниковых данных о влагосодержании атмосферы // Успехи современного естествознания. – 2016. – №2. – С.137-141.
2. **Аль-Тамими М.А.**, Чукин В.В. Прогноз глобальных среднегодовых значений влагосодержания атмосферы и интенсивности осадков на основе данных статистической модели солнечно-земных связей // Естественные и технические науки. – 2016. – №3. – С.95-103.
3. **Al-Tameemi M.A.**, Chukin V.V. Global water cycle and solar activity variations // J. Atmos. Solar-Terrest. Phys. – 2016. – Vol.142. – P.55-59.

Публикации в других изданиях

1. Чукин В.В., **Аль-Тамими М.А.**, Шермухамедов У.А. Влияние космической погоды на глобальный гидрологический цикл // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы Международной научной конференции 5-8 мая 2015 г. – Минск, 2015. – С.75-77.