

## **О современных изменениях климата и уровня Мирового океана**

**В.Н.Малинин**

(РГГМУ)

Обсуждается вклад различных факторов в современные колебания уровня Мирового океана (УМО). Приводится осредненный по данным разных авторов глобальный ряд (УМО) и рассматриваются его тренды за разные промежутки времени. Рассматривается возможность построения системы мониторинга УМО по данным 5 длиннорядных станций. Даются оценки трендов приповерхностной температуры воздуха и анализ факторов их обуславливающих. Показано, что парниковый эффект (ПЭ) может быть объяснен современным повышением влагосодержания атмосферы. Приводятся результаты расчета линейной модели УМО от аномалий температуры воздуха в северном и южном полушариях.

Современное состояние проблемы колебаний уровня Мирового океана (УМО) с учетом вклада в них различных факторов изложено в докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change) в 2000 г. [1]. Как следует из этого доклада, в соответствии с некоторыми сценариями изменений климата, основанных на результатах численного моделирования, при удвоении содержания  $\text{CO}_2$  и соответствующего увеличению средней глобальной температуры приземного слоя произойдут значительные изменения компонент гидрологического цикла, в том числе уменьшение массы горных ледников, морских льдов, шельфовых ледников в Антарктиде. Вследствие этого УМО может повыситься на 10-30 см к 2030 г. и в пределах 30-100 см (наиболее вероятно 65 см) к концу столетия.

Естественно, если такое развитие изменений климата станет реальностью, то это грозит катастрофическим ущербом для инфраструктуры прибрежных территорий, где проживает около миллиарда жителей Земли. Поэтому проблема возможных изменений УМО в связи с потеплением климата приобретает исключительную актуальность.

Известно, что систематические наблюдения за уровнем моря имеют довольно длительную историю. Так, регулярные измерения уровня начались в Амстердаме в 1765 г., причем эпизодические наблюдения здесь выполнялись еще в начале 18-го века. В настоящее время сеть наблюдений насчитывает более 1700 станций, которые Межправительственной океанографической комиссией при ЮНЕСКО объединены в единую международную систему GLOSS (Global Sea Level Observing System) – Глобальную Систему Наблюдений за Уровнем Моря. Основной частью этой системы служат среднемесячные данные по уровню, хранящиеся в базе данных Permanent Service for Mean Sea Observing System Level (PMSL).

Другим источником информации об уровне служит метод спутниковой альтиметрии. Ее принципиальное отличие от традиционных футшточных наблюдений состоит в том, что альтиметрический метод позволяет получить оценки уровенной поверхности океана практически на всей его акватории, а не только вдоль береговой черты. Спутниковая альтиметрия осуществляет измерение расстояния между спутником и поверхностью отражения по времени прохождения сигнала бортового радарного высотомера, передающего со скоростью света высокочастотные радиосигналы и получающего отраженный от морской поверхности сигнал. Независимое определение параметров орбиты спутника (широта, долгота, высота) относительно земного эллипсоида позволяет найти высоту уровня океана. При этом альтиметрические измерения, отсчитываемые от поверхности геоида, показывают возмущения относительно среднего стационарного состояния уровенной поверхности океана.

В общем случае изменения УМО ( $\Delta h_M$ ) представляют собой сумму эвстатической ( $\Delta h_E$ ), стерической ( $\Delta h_C$ ) и деформационной ( $\Delta h_D$ ) компонент, т.е.

$$\Delta h_M = \Delta h_E + \Delta h_C + \Delta h_D. \quad (1)$$

К эвстатическим компонентам относятся составляющие водного и ледового балансов: испарение, осадки, приток речных вод, айсберговый сток и т.д. Стерические колебания обусловлены изменениями плотности морской воды за счет соответствующих изменений температуры и солености. Сумма эвстатической и стерической компонент представляет собой объемные колебания УМО, которые вызваны изменениями в бассейне количества воды, а деформационными называются такие колебания, при которых происходит перераспределение массы воды в границах моря (бассейна) при неизменном объеме воды таким образом, что уровень повышается в одних районах и понижается в других. Очевидно, что глобальные деформационные колебания уровня вызывают, прежде всего, вертикальные движения земной коры и донное осадконакопление.

Нетрудно показать, что УМО является интегральным индикатором глобального водообмена, перераспределяющим воды гидросферы между отдельными оболочками Земли и, прежде всего, между водами литосферы и криосферы [2]. Естественно считать, что в течение достаточно длительного исторического периода в развитии гидросферы общий объем ее вод, состоящий из вод Мирового океана ( $V_O$ ), криосферы ( $V_K$ ), литосферы ( $V_L$ ) и атмосферы ( $V_A$ ), является практически постоянным. Отсюда следует

$$\Delta V_A + \Delta V_O + \Delta V_K + \Delta V_L = 0. \quad (2)$$

В уравнении (2) величина  $\Delta V_O$  представляет изменения объема только за счет эвстатических факторов. Поскольку атмосфера является неинерционной средой, то в ней можно пренебречь изменениями запасов влаги. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\Delta h_{\Theta} = A_M^{-1} \Delta V_O = A_M^{-1} (-\Delta V_K - \Delta V_L), \quad (3)$$

где  $A_M$  - площадь Мирового океана (МО). Весьма важно, что площадь МО можно считать квазипостоянной, по крайней мере, за последние несколько тысяч лет. Если, например, принять,  $A_M=362$  млн. км<sup>2</sup>, то при изменении УМО на 1 мм объем МО изменится на 362 км<sup>3</sup>. Подставляя (3) в (1), имеем

$$\Delta h_M = A_M^{-1} (-\Delta V_K - \Delta V_L + \Delta V_C) + \Delta h_d, \quad (4)$$

где  $\Delta V_C$  – изменения объема вод МО за счет плотности.

Отметим, что роль отдельных компонент в суммарных колебаниях УМО существенно различна. В частности, по-видимому, можно пренебречь суммарным вкладом в  $\Delta h_M$  деформационных колебаний. Так, есть основания полагать, что в современных климатических условиях при глобальном осреднении колебания уровня за счет тектонических движений земной коры, последние имеют разный знак в различных регионах Земли и нивелируют друг друга. Что касается донного осадконакопления, то оно способствует повышению УМО, однако его величина для масштабов времени, не превышающих нескольких десятков лет, является весьма малой (рисунок 1).

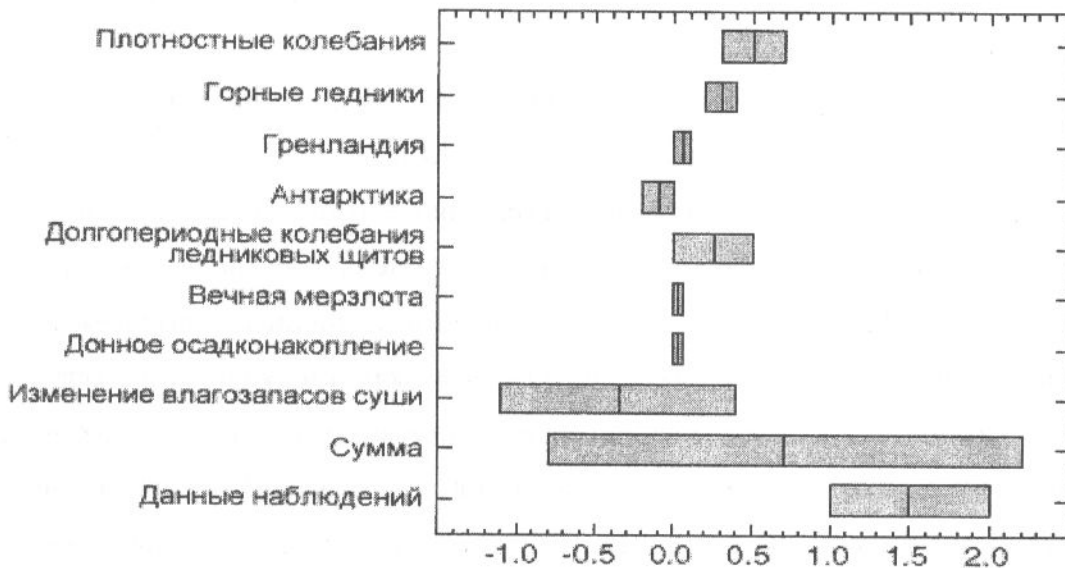


Рисунок 1. - Оценки вкладов различных процессов в изменения уровня Мирового океана в XX столетии по данным IPCC [1].

К сожалению, эвстатические и стерические глобальные колебания УМО очень сложно отделить друг от друга и, прежде всего, из-за сложности оценки плотностной компоненты. Вклад её в  $\Delta h_M$  по мнению разных авторов меняется в очень широком диапазоне: от почти полного игнорирования [4,5] до 30-50 % [1]. По оценкам экспертов IPCC, основанным на результатах моделирования климата, вклад термического

расширения в изменения уровня за период 1910-1990 гг. составляет 0.3-0.7 мм/год, причем за последнее десятилетие XX-го столетия он достигает 1 мм/год.

Особый интерес представляет выяснение вклада компонент криосферы в колебания УМО. Уравнение баланса воды в твердой фазе представим как

$$\Delta V_K = \Delta V_{\text{лщ}} + \Delta V_{\text{гл}} + \Delta V_{\text{мл}} + \Delta V_{\text{ссп}} + \Delta V_{\text{вм}}, \quad (5)$$

где слагаемые в правой части формулы (5) означают изменения объема ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии, горных ледников, морских льдов, сезонного снежного покрова и вечной мерзлоты. Естественно, что главный вклад в колебания УМО следует ожидать от ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды. Эксперты ИРСС разграничили их влияние на 2 компоненты: короткопериодную, обусловленную непосредственно изменениями климата за 1910-1990 гг. и долгопериодную, связанную с палеоклиматическими колебаниями. Из их оценок следует, что эти компоненты имеют противоположные тенденции. С одной стороны, вследствие потепления климата и повышения количества осадков происходит некоторое увеличение массы ледникового покрова Антарктиды, а с другой – его разрушение за счет откалывания айсбергов.

Принимая во внимание огромное значение изменений массы ледниковых покровов в колебаниях глобального водного баланса, рассмотрим этот вопрос более подробно. В таблице 1 приводятся составляющие водного баланса Антарктиды и Гренландии за многолетний период, систематизированные группой экспертов ИРСС. Испарение принято равным нулю, поскольку его величина в среднем за год для всего ЛП Антарктиды близка к конденсации влаги. Как следует из таблицы 1, разброс в оценках компонент ледового баланса Антарктиды (разность между максимальной и минимальной оценками) примерно одинаков. Однако, если по отношению к осадкам и айсберговому стоку он не превышает 20 %, то по отношению к донному таянию он практически сравним с его средней величиной. Это означает, что даже точность среднемноголетних значений донного таяния в настоящее время практически не поддается количественной оценке. Донное таяние шельфовых ледников, очевидно, наиболее интенсивное в последние два десятилетия XX-го столетия, дает вклад в изменения УМО до 2 мм/год. Возможно поэтому в водах, омывающих Антарктиду, отсутствует положительный тренд в температуре воды, ибо дополнительное тепло как раз расходуется на донное таяние ледников.

Итак, анализ данных в таблице 1 позволяет сделать достаточно очевидный вывод, что для современного периода характерно некоторое уменьшение массы ЛП Антарктиды. Заметим, что аналогичный вывод, вероятно, впервые был сделан в России В.М.Котляковым, К.С.Лосевым и И.А.Лосевой [6], которые пришли к выводу, что в настоящее время, скорее всего, наблюдается уменьшение ЛП Антарктиды, составляющее  $\sim 750 \text{ км}^3$ , которое должно вызвать подъем уровня Мирового океана на 2-3 мм/год. На наш

взгляд, в ближайшие десятилетия именно проблема комплексного изучения донного таяния шельфовых ледников в связи с потеплением климата может быть ключевой при оценке влияния ЛП Антарктиды на изменения УМО.

Что касается водного баланса Гренландии в 20-м столетии, то его можно считать близким к равновесному (таблица 1). Только максимальные оценки дают некоторое превышение расходных компонент над приходными. Однако следует иметь в виду, что спутниковые наблюдения в последние годы отчетливо показывают тенденцию к расширению зоны жидкого стока с поверхности ЛЩ Гренландии.

Таблица 1 - Водный баланс Антарктиды и Гренландии в  $10^{12}$  кг/год или в  $\text{км}^3/\text{год}$  в 20-м столетии по данным экспертов IPCC [11]

Компонента баланса	ЛП Антарктиды			ЛП Гренландии		
	Min	среднее	Max	Min	среднее	Max
Аккумуляция	2000	2246	2344	461	520	547
Твердый сток	1800	2072	2400	205	235	280
Жидкий сток	-	-	-	256	297	347
Донное таяние	320	540	736	-	-	-
Баланс	-120	-366	-792	0	-12	-80

Что касается вклада в колебания УМО горных ледников (рисунок 1), то он ориентировочно составляет 0.2-0.4 мм/год, а вкладом за счет таяния льдов вечной мерзлоты пока что можно еще пренебречь (0.0-0.05 мм/год).

Вклад колебаний вод суши в изменения УМО обусловлен главным образом колебаниями притока материковых вод и частично изменениями объема бессточных озер. По данным IPCC расхождения в суммарных изменениях вод литосферы составляют от -1.1 мм/год до 0.4 мм/год (рисунок 1) и на наш взгляд, они являются чрезмерными. Принимая во внимание, что именно на суше мы имеем наиболее репрезентативную измерительную сеть за водами гидросферы, они служат яркой иллюстрацией низкого уровня современных представлений о характере глобального водообмена.

В настоящее время известен целый ряд работ [5,7-10], в которых выполнен расчет УМО по инструментальным данным за различные по длительности периоды времени. Поскольку очень сложно отдать какой-либо из указанных работ явный приоритет, то мы выполнили осреднение рядов глобального УМО за период 1901-1958 гг., который является общим для указанных рядов. Отметим, что предварительно все ряды были приведены к единой системе отсчета, в качестве которой с целью удобства за начало отсчета принята величина 100 мм в 1901 году. Естественно, в результате такого осреднения происходит занижение дисперсии межгодовых колебаний УМО, зато

исключаются случайные ошибки и более явно проявляются долговременные тенденции в их колебаниях.

На рисунке 2 приведена осредненная кривая глобального УМО. Как и следовало ожидать, главной закономерностью колебаний УМО является наличие мощного линейного тренда. Параметры его даются в таблице 2. Средняя скорость роста уровня МО составляет 1.6 мм/год, причем тренд описывает почти 90 % дисперсии исходного ряда. Тем не менее, довольно отчетливо выделяются два периода с существенно различными изменениями УМО. Если в течение 1901-1923 гг. уровень практически не менялся (фаза стояния уровня), то, начиная с 1924 г. он начал стремительно расти. В течение 1924-1958 гг. рост УМО достигал 2.8 мм/год.

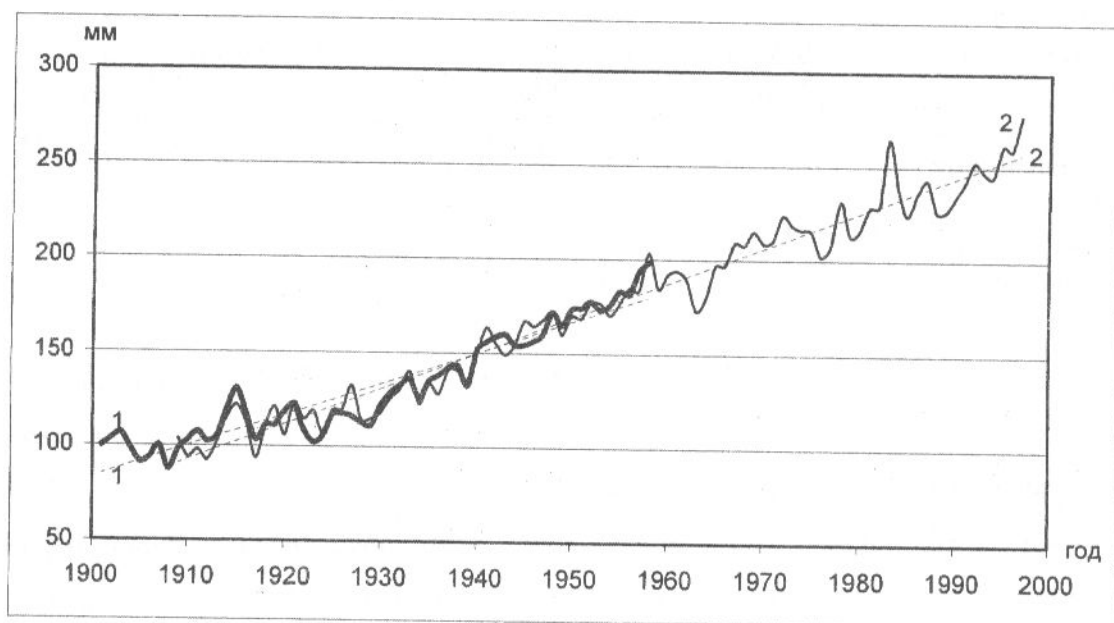


Рисунок 2 – Осредненный по данным разных авторов (1) и вычисленный по модели (6) уровень Мирового океана (2) и их линейные тренды.

На наш взгляд, очень важной задачей является построение системы мониторинга УМО на основе инструментальных измерений. С этой целью из архива PMSL было отобрано несколько десятков самых длиннорядных станций, расположенных в разных районах Мирового океана. Затем для межгодовых колебаний УМО методом включения переменных строилась оптимальная линейная модель многофакторной регрессии вида

$$h_M = f(b_j, h_j), j=1, k.$$

где  $k$  – число уровнемерных станций. В качестве зависимой выборки использовался период 1925-1958 гг. В результате была получена следующая модель

$$h_M = -b_0 + b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3 + b_4 h_4 + b_5 h_5 \quad (6)$$

где  $h_1 - h_5$  значения уровня в пунктах (в порядке значимости): Boston ( $42^{\circ}21' N, 71^{\circ}3' W$ ), San Francisco ( $37^{\circ}48' N, 122^{\circ}28' W$ ), Key West ( $24^{\circ}33' N, 81^{\circ}48' W$ ), Swinoujście ( $53^{\circ}55' N, 14^{\circ}14' O$ ), Ratan ( $64^{\circ} N, 20^{\circ}55' O$ ). Уже первый коэффициент корреляции УМО с Boston достигает 0.91. Коэффициент детерминации данной модели равен  $R^2=0.94$ , то есть модель описывает 94 % дисперсии функции отклика, а стандартная ошибка модели  $\sigma=6.6$  мм/год.

Таблица 2 – Оценка параметров линейного тренда в межгодовых колебаниях УМО

Годы	Осредненные значения УМО		Вычисленные по модели (4) значения УМО	
	Величина тренда, мм/год	Коэффициент детерминации, $R^2$	Величина тренда, мм/год	Коэффициент детерминации, $R^2$
1901-1958	1.62	0.89	---	---
1909-1958	1.78	0.90	1.82	0.91
1959-1997	---	---	1.88	0.82
1909-1997	---	---	1.87	0.96

Таким образом, на зависимых данных модель (6) с высокой точностью описывает исходный ряд УМО. Естественно, очень важно, чтобы модель (6) была бы такой же точной и на независимых данных. С этой целью использован независимый отрезок времени 1909-1924 гг. Коэффициент корреляции оказался равным  $r=0.70$ , а стандартная погрешность составила 7.7 мм/год, то есть лишь незначительно превышает ошибку по зависимой выборке. Это позволяет возможным осуществить расчет УМО после 1958 года. Такой расчет был выполнен до 1997 г. Межгодовой ход вычисленных значений УМО за период 1909-1997 гг. также представлен на рисунке 2. Нетрудно видеть, что рост УМО продолжается. Весьма важно, что тренды для исходного и вычисленного ряда за один и тот же промежуток времени (1909-1958 гг.) оказались очень близкими (таблица 1). Если рассматривать ряд УМО с 1958 г., то также можно выделить фазу почти стояния уровня (1958-1976 гг.), а затем его быстрый рост. Средняя величина тренда в 20-м столетии близка к 1.8 мм/год.

Естественно, что региональные отличия колебаний уровня от колебаний глобального УМО могут быть не только значительными, но даже иметь противоположный знак. Например, в колебаниях осредненного по акватории Балтийского моря уровня отмечается отрицательный тренд, который за период с 1892 по 1994 гг. составлял -0.6 мм/год, причем в течение более 60 лет (с 1912 по 1977 гг.) он превышал -1 мм/год [11]. Это связано с тем, что большая часть побережья моря подвержена хорошо выраженным вертикальным тектоническим движениям, причем на северо-восточном побережье

Швеции скорость поднятия земной коры достигает 6-7 мм/год, в то время как южное побережье моря опускается со скоростью около 1 мм/год.

Колебания УМО как индикатора процессов глобального водообмена и перераспределения вод гидросферы должны быть тесно связаны с изменениями климата. Как известно, глобальный климат - это статистическая совокупность состояний, свойственная климатической системе, состоящей из океана, атмосферы, литосферы, криосферы и биосферы за период времени несколько десятилетий. Поскольку наиболее часто используемым показателем глобального климата является приповерхностная температура воздуха (ПТВ), то обратимся к рисунку 3, на котором приводится межгодовой ход аномалий ПТВ для каждого из полушарий и земного шара в целом за период 1880-2005 гг. При этом аномалии ПТВ отсчитывались от базового периода 1950-1980 гг.

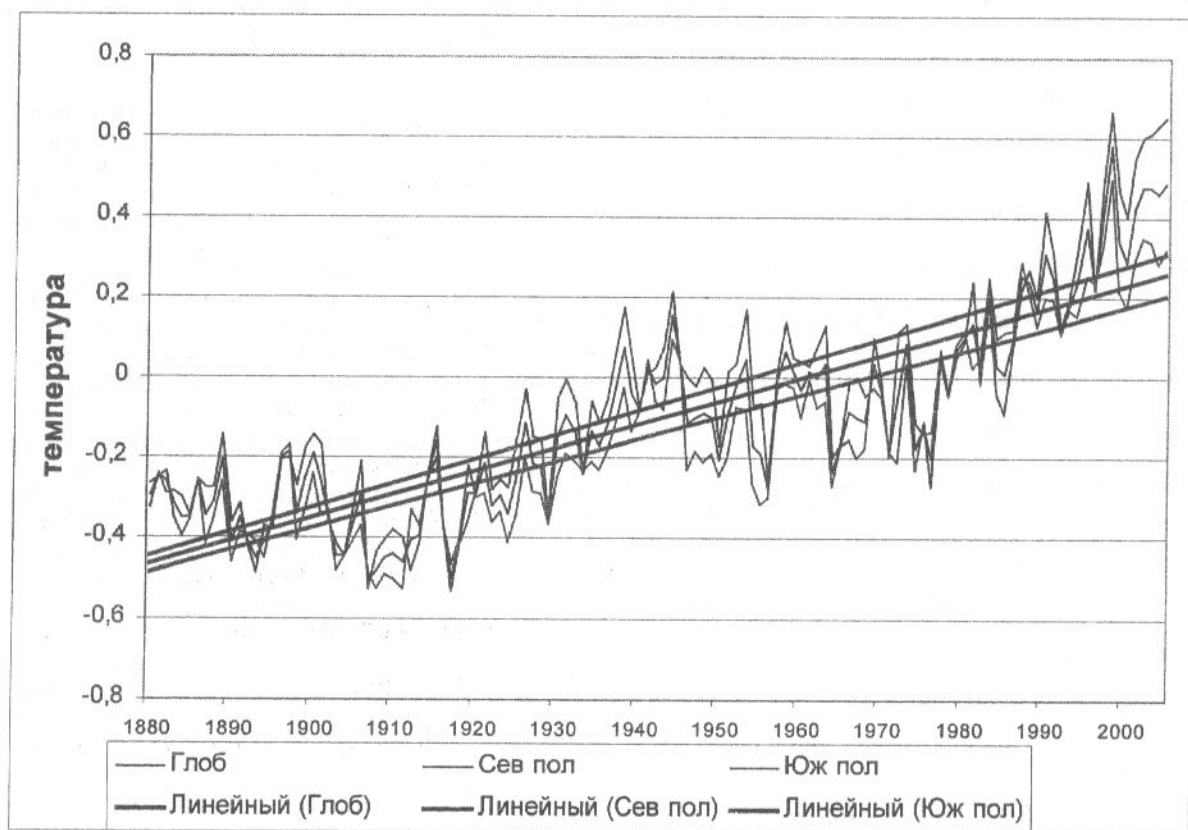


Рисунок 3 - Межгодовая изменчивость температуры воздуха в северном и южном полушариях и на земном шаре в целом за 1880-2005 гг. и их линейные тренды.

Из рисунка 3 видно, что в целом отмечается согласованный характер изменений ПТВ в каждом из полушарий. Естественно, что в северном полушарии дисперсия колебаний несколько выше. Примерно до начала 1940-х годов наблюдался сравнительно быстрый рост температуры. Особенно ярко он проявлялся в высоких широтах северного



полушария. Поэтому 20-40 годы получили название «потепление Арктики». Затем вплоть до середины 70-х годов отмечалось практически повсеместное похолодание, характеризующееся значимым отрицательным трендом. И только после этого произошел резкий рост ПТВ, продолжающийся до настоящего времени. Последнее десятилетие 20-го столетия считается самым теплым за весь период инструментальных измерений температуры воздуха.

Оценки трендов в ПТВ за различные промежутки времени приведены в таблице 3. Естественно, тренд в северном полушарии выше, чем в южном полушарии, как по его величине ( $\Delta T/10\text{лет}$ ), так и по степени вклада в дисперсию колебаний температуры, представленным в виде коэффициента детерминации  $R^2$ . В течение 1941-1975 гг. тренд в южном полушарии вообще отсутствовал, для всех остальных промежутков времени тренды являются значимыми. Величина тренда в 1976-2005 гг. более чем в два раза превышает его значение до 40-х годов прошлого столетия. С учетом последнего десятилетия можно утверждать, что ПТВ на земном шаре за последние сто лет увеличилась более чем на  $0.6^\circ\text{C}$ . Это очень хорошо согласуется с оценками, полученными другими авторами.

Таблица 3 - Оценки линейных трендов ПТВ за различные периоды времени

Период, годы	Северное полушарие		Южное полушарие		Земной шар	
	$R^2$	$\Delta T/10\text{лет}$	$R^2$	$\Delta T/10\text{лет}$	$R^2$	$\Delta T/10\text{лет}$
1880-2005	0.62	0.072	0.58	0.055	0.64	0.064
1880-1940	0.64	0.109	0.32	0.046	0.59	0.077
1941-1975	0.30	-0.074	0.02	-0.014	0.21	-0.044
1976-2005	0.68	0.252	0.56	0.116	0.65	0.182

Казалось бы, вопрос с глобальным потеплением настолько очевиден, что не может быть никаких сомнений. Тем не менее, некоторые неясности по величине тренда все же существуют, так как репрезентативность глобальных и полушарных оценок ПТВ, особенно для первой половины 20-го века явно недостаточна. Это связано, прежде всего, с редкой сетью станций. Кроме того, огромные акватории МО, особенно в южном полушарии, вообще не освещены наблюдениями. Наконец, метеорологические станции размещены, как правило, в городах. Однако известно, что города служат дополнительными очагами тепла. Например, температура внутри Москвы и за ее пределами зимой может различаться до  $10^\circ\text{C}$ . Таким образом, при глобальном осреднении данных по ПТВ могут возникать систематические ошибки, учесть которые чрезвычайно сложно. Впрочем, хотя все это может сказаться на величине тренда, но вряд ли может изменить принципиальный характер самого факта его существования в ПТВ в 20-м столетии.

В таблице 4 представлены оценки линейных трендов для отдельных сезонов года в разных регионах Земли за период 1891-1992 гг. [12]. Нетрудно видеть, что потепление главным образом происходило зимой и весной северного полушария. При этом самое сильное потепление отмечалось в Северной Азии, где оно зимой достигало 1.5 °С/100лет. Практически оно отсутствовало на акватории МО. Пожалуй, самым важным является то, что для всех сезонов года тренд имеет положительный знак.

Впрочем, эти результаты не означают, что повышение ПТВ происходит повсеместно. Безусловно, есть некоторые локальные районы, где отмечено похолодание. Например, это северо-западная Атлантика и южная Гренландия. Для района Санкт-Петербурга за период 1851-2001 гг. отмечается очень сильное потепление, достигающее 1.32 °С/100лет. Однако следует иметь в виду, что с ростом города постоянно усиливалось и тепловое пятно, влияние которого на величину тренда оценить чрезвычайно сложно.

Таблица 4 - Сезонные тренды температуры воздуха (°С/100 лет) за период 1891-1992 гг.

Регионы	Сезон года			
	XII-I-II	III-IV-V	VI-VII-VIII	IX-X-XI
Земной шар	0.61	0.59	0.31	0.32
Северное полушарие	0.65	0.63	0.28	0.29
Южное полушарие	0.50	0.52	0.38	0.37
Европа	0.63	0.67	0.17	0.36
С. Азия	1.50	1.20	0.27	0.36
С. Америка	0.23	0.56	0.71	0.13
С. Африка	0.28	0.51	0.05	0.06
Ю. Азия	0.30	0.35	0.29	0.27
Ю. Африка	0.72	0.68	0.49	0.18
Океания	0.01	0.33	0.27	0.17
Ю. Америка	0.69	0.68	0.52	0.82

Таким образом, сделав однозначный вывод о глобальном потеплении в 20-м столетии, сразу же возникает вопрос об его причинах. Очевидно, в рассматриваемом диапазоне времени (от 1 года до нескольких десятилетий) к естественным факторам формирования климата относятся процессы крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы, природные колебания состава воздуха атмосферы за счет вулканизма и других процессов, а также возможно космогеофизические силы (изменения скорости вращения Земли, «полюсный прилив», солнечная активность и др.). Из указанных факторов именно крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы, представляет собой важнейший естественный механизм формирования короткопериодных колебаний климата [13].

Антропогенные изменения климата, прежде всего, связываются с парниковым эффектом (ПЭ), обусловленным выбросами в атмосферу отходов промышленного производства (всевозможные примеси и газы), а также сжиганием ископаемого топлива

(нефтяные продукты, газы, древесина). При этом особого внимания заслуживает углекислый газ  $\text{CO}_2$ , стремительный рост содержания которого уже давно зафиксирован исследователями. В настоящее время атмосфера содержит на 25 % больше  $\text{CO}_2$ , чем было накоплено за последние 160 000 лет и содержание этого газа в последние годы возрастает на 0,5 % ежегодно (таблица 5). Следует ожидать, что примерно к 2050 г. произойдет его удвоение по сравнению с доиндустриальной эпохой. Отметим, что начиная с 1970-х годов, рост концентрации  $\text{CO}_2$  стал опережать рост поступления углерода непосредственно от сжигания ископаемого топлива, что может быть вызвано совокупным влиянием ряда факторов (вырубкой тропических лесов, возможным уменьшением поглощения  $\text{CO}_2$  океаном и т.д.).

Таблица 5 - Оценка концентраций основных парниковых газов в атмосфере по данным экспертов IPCC

Концентрация	$\text{CO}_2$	Метан, $\text{CH}_4$	Хлорфторуглеродные соединения		Закись азота, $\text{N}_2\text{O}$
			CFC-11	CFC-12	
Доиндустриальная концентрация	280 млн <sup>-1</sup>	700 млрд <sup>-1</sup>	0	0	270 млрд <sup>-1</sup>
Современная концентрация	365 млн <sup>-1</sup>	1745 млрд <sup>-1</sup>	268 трил <sup>-1</sup>	14 трил <sup>-1</sup>	314 млрд <sup>-1</sup>
Темпы изменения концентрации за 1 год	1.5 млн <sup>-1</sup> (0.5 %)	7.0 млрд <sup>-1</sup> (0.9 %)	-1.4 трил <sup>-1</sup> (4 %)	0.55 трил <sup>-1</sup> (4 %)	0.8 млрд <sup>-1</sup> (0.25 %)
Время жизни, годы	5-200	12	45	260	114

В данной таблице обращает на себя внимание оценка времени жизни  $\text{CO}_2$ , составляющая от 5 до 200 лет. С одной стороны – это яркая иллюстрация наших представлений о закономерностях газового состава атмосферы, а с другой – если принять время жизни  $\text{CO}_2$  за 5 лет, то взгляд на ПЭ может кардинально измениться.

Вспомним, что основным парниковым газом является водяной пар, вклад которого в ПЭ составляет 60 %. По данным экспертов IPCC влагосодержание атмосферы увеличилось на несколько процентов, причем над территорией США до 10 % за последние 20 лет. Теперь взглянем на проблему ПЭ под другим углом зрения. Как известно, ПЭ можно определить по разности теплового (длинноволнового) излучения подстилающей поверхности  $E$  и уходящей длинноволновой радиации  $F$ , т.е.  $G = E - F$ . В работе Уэбба, Слинго, Стефанса [14] показано, что приближенно ПЭ можно оценить по следующей формуле

$$G' = 1/(1 - g) = 1/\{1 - \epsilon_A[1 - (T_A/T_s)^4]\}, \quad (7)$$

где  $G' = E/F_{\text{clear}}$ , (введение величины  $F_{\text{clear}}$  вместо  $F$  обусловлено тем, что парниковый эффект формируется в основном при ясном небе),  $g = [1 - (T_A/T_s)^4]$ ,  $\epsilon_A$  - излучательная способность атмосферы,  $T_A$  - средняя температура атмосферы,  $T_s$  - температура подстилающей поверхности. Принимается, что величина  $\epsilon_A$  пропорциональна общему влагосодержанию атмосферы  $W$ .

Из анализа данной формулы следует, что влияние влагосодержания и температуры проявляется раздельно: первое - через  $W$ , второе - через  $T_A$ . Возрастание  $W$  приводит к увеличению  $G'$  и  $g$ , тогда как повышение  $T_A$  обуславливает уменьшение контраста температуры между подстилающей поверхностью и атмосферой, вследствие чего происходит уменьшение  $G'$ .

Установлено, что в низких широтах изменчивость величины ПЭ в доминирующей степени определяется  $W$ , изменчивость которого, по мнению авторов, контролируется ТПО. В средних и высоких широтах имеет место значительный годовой ход ПЭ с максимумом зимой и минимумом летом. Естественно, что влагосодержание, имеющее максимум летом, не может влиять на годовой ход ПЭ, который определяется годовым ходом температуры. Результатом совместного действия этих факторов является формирование меридионального профиля ПЭ при ясном небе, которому соответствует уменьшение  $G'$  к полюсам, причем в южном полушарии градиент более сильный, чем в северном полушарии.

В работе автора [15] показано, что в пределах Мирового океана межгодовые колебания  $W$  и температуры приводного слоя  $t_z$ , функционально связанной с  $T_A$ , тесно взаимосвязаны друг с другом. Эта связь, исключая полярные районы, выражается формулой

$$W = 7.8 \cdot 10^{3.83t_z/(169-t_z)} \quad (8)$$

Ошибка расчета  $W$  по данной формуле составляет 2-4 % по независимым данным. Как известно, среднее значение  $W$  над Мировым океаном составляет немногим более 29 кг/м<sup>2</sup> [15]. Примем, например, за начальное значение влагосодержания величину  $W = 29.6$  кг/м<sup>2</sup>, которому соответствует значение  $t_z = 22.2$  °С и вычислим оценки  $W$  при изменении температуры с шагом 0.2 °С (таблица 6).

Из таблицы 6 видно, что при изменении температуры на 0.6 °С, соответствующей современному тренду глобального потепления за столетний период, влагосодержание увеличивается на 1.2 кг/м<sup>2</sup> или на 4 %. Отсюда вполне допустим и обратный вывод, что повышение  $W$  всего на 4 % через парниковый эффект может привести к увеличению температуры на 0.6 °С. Такие малые колебания  $W$  вполне возможны в результате естественных причин, связанных с крупномасштабным влагообменом в системе океан-

атмосфера. В свою очередь, повышение температуры способствует увеличению  $W$ . Естественно, что такая прямая связь работает и в том случае, когда одна из этих характеристик не начнет изменяться в противоположную сторону. Итак, даже простой модельный расчет показывает, что водяной пар как сильный парниковый газ вполне может приводить к наблюдаемым в современный период изменениям температуры воздуха.

На наш взгляд, современное потепление климата, как справедливо отмечено К.Я. Кондратьевым [16], обусловлено не только ростом концентрации ПГ, но и естественными факторами. Такой вывод можно сделать по нескольким причинам:

- пространственное распределение потепления в обоих полушариях совершенно различно и не соответствует результатам численного моделирования;
- оценки «парникового потепления» дают значения, близкие к природно обусловленным;
- рост концентрации  $CO_2$  и других ПГ может быть частично вызван и природными факторами;
- весьма важно, что потепление в 20-м столетии было сконцентрировано в течение двух периодов: в 20-40 годы и после 1975 года. С 40-х годов до начала 70-х в северном полушарии имело место похолодание климата, хотя в это время промышленность интенсивно развивалась. В южном полушарии ПТВ оставалась неизменной.
- отмечается значительная пространственная дифференциация в изменениях климата. В некоторых регионах (в том числе и в северном полушарии) после 1975 г. вплоть до последнего времени продолжалось похолодание.

Таблица 6 - Оценка изменений влагосодержания атмосферы и температуры воздуха

Характеристика	Значения характеристики					
$T, ^\circ C$	22.2	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2
$W, \text{кг/м}^2$	29.6	30.0	30.4	30.8	31.3	31.7
$\Delta T, ^\circ C$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$\Delta W, \text{кг/м}^2$	0	0.4	0.8	1.2	1.7	2.1
$\Delta W/W, \%$	0	1.3	2.6	3.9	5.4	6.6

Как уже указывалось выше, колебания УМО должны быть тесно связаны с изменениями климата и, следовательно, с его потеплением в 20-м столетии. Существует даже мнение, что УМО является индикатором глобального потепления [17]. По-видимому, это некоторое преувеличение, ибо формирование колебаний УМО происходит не только за счет климатических факторов.

Поскольку взаимнокорреляционный анализ между УМО и глобальной ПТВ показывает наличие значимой связи, то рассмотрим следующую простую линейную модель

$$h_{Mi} = b_0 + b_1\Delta T_{C(i-\tau)} + b_2\Delta T_{Ю(i-\tau)}, \quad (9)$$

где  $\Delta T_C$  и  $\Delta T_{Ю}$  – аномалии температуры воздуха в северном и южном полушариях,  $\tau$  – сдвиг в годах. Модели рассчитывались, начиная со сдвига  $\tau = 0$  до сдвига  $\tau=35$  лет. Прежде всего, отметим значительно более высокую связь УМО с  $\Delta T_C$  по сравнению с  $\Delta T_{Ю}$ . В результате расчетов было получено, что адекватные по критерию Фишера модели отмечаются при нулевом сдвиге, а также при сдвигах  $\tau =20$  и  $\tau =30$  лет (таблица 7). Нетрудно видеть, что при нулевом сдвиге модель (7) описывает 50 % дисперсии колебаний УМО. Очевидно, это связано с «быстрыми» изменениями эвстатической и стерической компонент.

Есть основания полагать, что при повышении ПТВ увеличивается количество осадков над океаном. Вследствие этого должно происходить как непосредственное повышение УМО, так и опосредованное за счет понижения плотности морской воды. Кроме того, возможно повышение температуры верхнего квазиоднородного слоя, которое также приводит к повышению уровня. Что касается сдвигов  $\tau=20$  и  $\tau=30$  лет, то в этом случае рост УМО может быть связан с «медленными» изменениями эвстатической и стерической компонент, т.е. с изменениями массы ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии, а также повышением температуры воды в толще вод океана.

Таблица 7 – Оценки параметров регрессионных моделей колебаний УМО с аномалиями ПТВ при различных сдвигах  $\tau$  (в годах)

Сдвиг, годы	Коэффициент детерминации, $R^2$	Стандартная ошибка модели, см/год	Критерий Фишера, F
0	0.50	3,3	17.4
20	0.44	3,1	12.5
30	0.56	2,3	7.7

Безусловно, изменения климата существенно влияют на экосистему Мирового океана, в том числе на промысловую продуктивность его вод. Исследования подобного рода в основном выполняются на региональном уровне. Представляется крайне важным нахождение глобальных связей между параметрами климатической системы (прежде всего, глобальными значениями температуры воды и температуры воздуха) и параметрами биологической продуктивности вод океана.

## Литература

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) WGI Third Assessment Report. Chapter 11. Changes in Sea Level. (Editors B.C. Douglas, A. Ramirez), 2000, 76 p.
- Догановский А.М., Малинин В.Н. Гидросфера Земли. – СПб, Гидрометеиздат, 2004, 631с.
- Малинин В.Н. О современном состоянии проблемы изменчивости вод гидросферы. – Ученые записки РГГМУ, 2005, вып.1, с.54-72.
- Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». – М., ГЕОС, 2002, 231 с.
- Клиге Р.К. Изменения глобального водообмена. - М.: Наука, 1985, 247 с.
- Котляков В.М., Лосев К.С., Лосева И.А. Ледовый баланс Антарктиды. Изв. АН СССР, сер. геог., 1977, №1, с.19-33.
- Barnett T.P. The estimation of global sea level change: a problem of uniqueness, J. Geophys. Res., 1984, vol.89, C5, p.7980-7988.
- Douglas B.C. Global sea rise: a redetermination. Survey in Geophysics. 1997, 18, p.279-292.
- Fairbridge R.W., Krebs O.A. Sea level and the southern oscillation. – Geophys. Res., 1962, Vol. 6, p. 32-545.
- Gornits, V., Lebedeff, L., Hansen, J. Global sea level trend in the past century. Science, 1982, 215, p.1611-1614.
- Гордеева С.М., Малинин В.Н. О межгодовой изменчивости компонент водного баланса Балтийского моря. – Труды РГГМУ, 1999, вып.123, с.64-80.
- Ivanyi Z. Variations and trends of land surface air temperature, 1891-1992. – Idojaras, 1997, Vol.101, No. 3, p.161-172.
- Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Дымников В.П. Некоторые проблемы теории климата. – Итоги науки и техники. Сер. Метеорология и гидрология. 1981, Т.7, 103 с.
- Webb M.J., Slingo A., Stephens G.L. Seasonal variations of the clear-sky greenhouse effect: the role of changes in atmospheric temperatures and humidities // Clim. Change. – 1993, Vol.9, No3, P.117-130.
- Малинин В.Н. Влагообмен в системе океан-атмосфера.– СПб, Гидрометеиздат, 1994, 196с.
- Кондратьев К.Я., Донченко В.К. Экодинамика и геополитика. Т.1. Глобальные проблемы. – СПб, 1999, 1032 с.
- Фукс В.Р. Уровень Мирового океана как индикатор глобального потепления. - География и современность. СПб, Изд. СПбГУ, 2005, вып.10, с.73-93.