

В.Н. Малинин

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА И КЛИМАТА

V.N. Malinin

GLOBAL SEA LEVEL AND CLIMATE VARIATION

Обсуждаются результаты выполненных в РГГМУ исследований по изучению уровня Мирового океана как индикатора изменений глобального климата. Рассматриваются закономерности межгодовой изменчивости уровня Мирового океана, даются оценки вкладов различных факторов в колебания уровня Мирового океана, приводятся методы его сверхдолгосрочного прогноза и предложена концепция формирования тренда глобальной температуры воздуха в современных изменениях климата.

Ключевые слова: уровень Мирового океана, пресноводный баланс, испарение, осадки, материковый сток, изменения климата, глобальная температура воздуха, парниковый эффект, влагосодержание атмосферы.

The results of research carried out in RSHU on global sea level study as an indicator of global climate change are discussed. The regularities of interannual variability of global sea level are considered, the estimates of different factors contribution to global sea level fluctuations are given, the methods of its very-long-term forecast are provided and the concept of global air temperature trend formation under modern climate change is proposed.

Key words: global sea level, freshwater balance, evaporation, precipitation, continental discharge, climate change, global air temperature, greenhouse effect, atmospheric moisture content.

Введение

Важнейшим индикатором глобального климата является уровень Мирового океана (УМО), изменения которого определяют как многие гидродинамические процессы в самом океане, так и характер его взаимодействия с атмосферой. Известно, что в течение XX в. происходил довольно быстрый рост уровня Мирового океана со скоростью примерно 1,7–1,8 мм/год. Однако в последние два десятилетия на основе альтиметрических данных установлено, что рост УМО заметно повысился и составляет уже 3,2 мм/год. К концу XXI в., по разным прогностическим оценкам, он может повыситься на 40–100 см по сравнению с его началом.

Естественно, если такое развитие изменений климата станет реальностью, то это грозит катастрофическим ущербом для инфраструктуры побережья океанов и морей, ибо именно эта пограничная зона между землей и океаном характеризуется особенно разнообразными экосистемами и именно на её территории предпочитает жить человек. Восемь из десяти крупнейших городов мира находятся на низменных прибрежных территориях, в том числе Нью-Йорк и Токио, а темпы роста численности населения в таких зонах в два раза превышают среднемировой показатель. К концу

XXI в. в прибрежных зонах не выше 1 м над уровнем моря будут проживать примерно 130 млн, а в зонах не выше 5 м — 410 млн человек. При росте уровня океана становится неизбежным затопление равнинных прибрежных территорий таких стран, как Бангладеш, Индонезия, Индия и др. Например, повышение уровня моря только на 40 см в Бенгальском заливе приведет к затоплению 11 % прибрежной зоны Бангладеш и переселению 7–10 млн беженцев. А всего потребуется переселение многих десятков миллионов человек. Кроме того, вполне возможно, что в зоне возможных наводнений могут оказаться дополнительно от 20 до 300 млн человек ежегодно [19].

В связи с этим проблему изучения долговременных колебаний уровня Мирового океана и особенно построения методов его долгосрочного прогноза, следует отнести к числу важнейших проблем современной гидрометеорологии. Во многих странах, особенно в США, на исследование данной проблемы тратятся огромные финансовые ресурсы. В России до последнего времени исследования морского уровня в основном выполнялись в региональном масштабе. Исключение составляют вышедшая еще в 1985 г. монография Р.К. Клиге [4], в которой по футшточным наблюдениям реконструирован глобальный уровень за столетний период (1881–1981), осуществлен прогноз глобального уровня на основе его корреляционной связи с температурой воздуха Северного полушария на 1982–1995 гг. и даны оценки вкладов различных факторов в колебания УМО, а также изданная в 1998 г. фундаментальная монография «История гидросферы» [5], в которой на основе многочисленных геологических и палеоклиматических данных восстановлен глобальный уровень океана за исторический период.

Во второй половине «нулевых» годов текущего столетия в РГГМУ в рамках различных грантов и ведомственных программ начались работы по изучению закономерностей межгодовых колебаний УМО на основе инструментальных наблюдений, выявлению их генезиса, оценке вклада различных «уровнеобразующих» факторов в формирование тренда УМО, построению комплекса физико-статистических моделей долгосрочного прогноза УМО с различной заблаговременностью. Результатом их стал цикл публикаций в периодической печати и издание двух монографий [6, 7], причем многие научные результаты получены впервые.

Межгодовая изменчивость уровня Мирового океана

В настоящее время существуют две принципиально различные системы наблюдений за морским уровнем. Это метод спутниковой альтиметрии, который позволяет получить оценки уровня поверхности океана практически на всей его акватории и береговые футшточные (мареографные) измерения уровня, имеющие довольно длительную историю. Безусловное достоинство береговых наблюдений — это наличие длительных серий наблюдений, а принципиальный недостаток — невозможность измерения уровня вне береговой черты. Поэтому изучение длительных колебаний УМО возможно только на основе береговых наблюдений. На основе пошагового метода множественной регрессии в РГГМУ впервые разработана статистическая модель [18], обеспечивающая минимальную ошибку восстановления межгодовых колебаний УМО по данным 5 береговых станций наблюдений с погрешностью 6,6 мм/год. Это

позволило реконструировать колебания УМО за период инструментальных наблюдений с 1861 по 2005 г., т.е. за 145 лет (рис. 1).

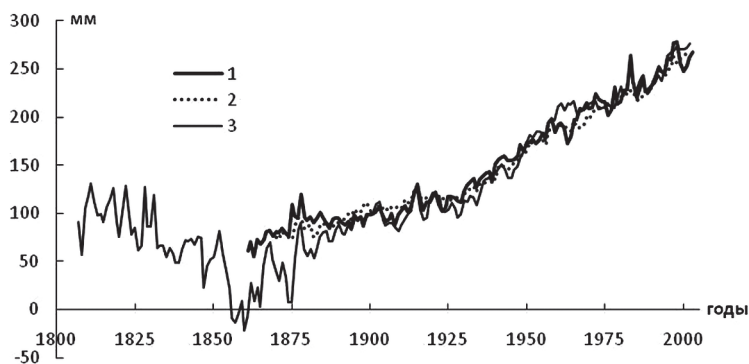


Рис. 1. Сопоставление временных рядов УМО, рассчитанных разными авторами: 1 — модель РГГМУ [18]; 2 — данные [20]; 3 — данные [24]

Средняя скорость роста уровня Мирового океана за рассматриваемый период времени составляет около 1,4 мм/год, причем тренд описывает 94 % дисперсии исходного ряда. Таким образом, наличие мощного линейного тренда является главной закономерностью межгодовых колебаний УМО. На фоне основного тренда в ходе УМО довольно отчетливо выделяется несколько периодов с различным характером изменений уровня, для которых локальные тренды различны. Это довольно быстрый рост УМО в 1861–1877 гг. ($Tr = 2,0$ мм/год), затем в течение 1879–1923 гг. уровень практически не менялся, т.е. наблюдалась фаза почти стояния уровня ($Tr = 0,4$ мм/год), после этого вплоть до настоящего времени он опять быстро растет ($Tr = 2,0$ мм/год). В течение XX столетия величина тренда достигала почти 1,8 мм/год. Сравнение ряда УМО, рассчитанного по статистической модели, с полученным по альтиметрическим данным за период 1993–2005 гг. показывает почти полное равенство линейных трендов. После исключения линейного тренда и дальнейших расчетов было выявлено, что из оставшихся 6 % дисперсии 61 % приходится на нелинейный тренд, а 20 % — на 60-летний цикл, который в рамках вейвлет-анализа является значимым.

Как видно из рис. 1, статистическая модель расчета УМО полностью совместима с аналогичными реконструкциями УМО других авторов [20, 24], полученными, в том числе, с использованием более 1000 станций глобального архива футшточных наблюдений PSMSL. Определенные преимущества ее перед западными аналогами заключаются в том, что, не уступая им в точности, для расчета УМО требуется минимум исходной информации, а именно, данные только нескольких стационарных береговых станций.

Установлено, что формирование тренда в годовых значениях уровня УМО можно рассматривать в виде статистической модели по типу «случайного блуждания» [11]. Суть ее состоит в последовательном суммировании внутригодовых приращений уровня (Δh_M), представляющего собой стационарный случайный процесс, развивающийся в виде модели «красный шум». Тренд этого нового ряда полностью идентичен тренду

среднегодовых значений УМО, т.е. $Tr(\Sigma\Delta h_M) = Tr(h_M)$. Физический смысл данного результата состоит в том, что при оценке вклада разных факторов в формирование тренда УМО представляется возможным использовать уравнения пресноводного баланса океана и изменений баланса вод в гидросфере.

Достаточно подробный спутниковый мониторинг изменений уровня Мирового океана проводится в Центре по хранению, верификации и интерпретации спутниковых океанографических данных во Франции (AVISO или Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data). Аналогичный мониторинг УМО выполняется также в университете Колорадо, США. Естественно, представляет интерес сравнение результатов мониторинга, выполненных в разных центрах по различающимся методикам. На рис. 2 приводятся декадные значения УМО за период 1993–2008 гг. по данным AVISO [25] и colorado.edu [26], сглаженные 60-дневным фильтром. Можно отметить хорошее соответствие между этими рядами, особенно после 1998 г. Линейные тренды уровня также хорошо согласуются, однако тренд по данным colorado.edu (3,2 мм/год) несколько выше, чем по данным AVISO (3,0 мм/год). Корреляция между указанными рядами составляет $r = 0,993$, но после исключения тренда она значительно уменьшается ($r = 0,73$).

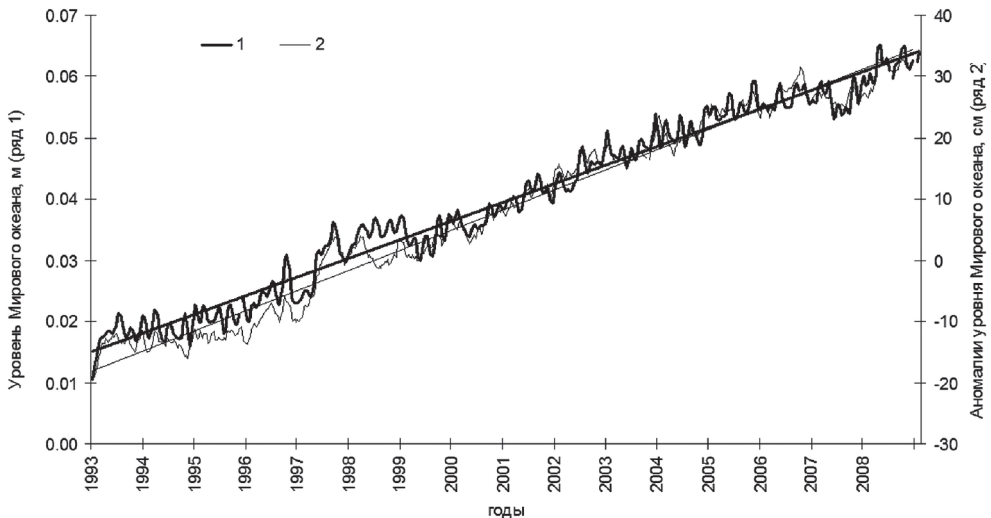


Рис. 2. Средний уровень Мирового океана по оценкам спутниковой альтиметрии за 1993–2008 гг.:
1 — по данным AVISO [25]; 2 — по данным colorado.edu [26]

Сопоставление годовых значений УМО по спутниковым и береговым данным, полученным разными авторами, показало, что дисперсия колебаний уровня, рассчитанного по береговым станциям, существенно выше. Это связано с тем, что пространственное осреднение альтиметрических данных охватывает практически всю акваторию МО, в то время как осреднение футшточных наблюдений проводится по ограниченному числу береговых станций.

Оценка вкладов различных факторов в межгодовую изменчивость уровня Мирового океана

В общем случае на уровенную поверхность океана действует большое число различных по своей природе факторов, которые можно объединить в три большие группы: космогеофизические силы, геолого-геодинамические процессы, гидрометеорологические процессы. При глобальном осреднении в межгодовом масштабе времени в современных условиях влиянием космогеофизических сил и геолого-геодинамических процессов (вертикальных движений земной коры и донным осадконакоплением) на УМО можно пренебречь вследствие их малости [4, 6]. В результате определяющими являются гидрометеорологические процессы, вызывающие объемные изменения уровня океана. Это эвстатические колебания, возникающие за счет составляющих пресноводного баланса (испарение, осадки, речной и айсберговый сток) и стерические колебания, обусловленные изменениями плотности морской воды. Таким образом, межгодовые изменения УМО можно записать как:

$$\Delta h_M = \Delta h_{\text{Э}} + \Delta h_{\text{стер}}. \quad (1)$$

Поскольку эвстатические и стерические колебания УМО обусловлены изменениями климата и, прежде всего, глобальной температурой воздуха, то межгодовые колебания УМО можно рассматривать как интегральный индикатор глобального климата. Одновременно с этим можно утверждать, что поскольку эвстатические колебания УМО перераспределяют воды гидросферы между отдельными оболочками Земли, т.е. между водами литосферы и криосферы, то они представляют собой показатель глобального водообмена природных вод.

Изучение генезиса межгодовых колебаний УМО возможно на основе двух основных подходов. Исходя из уравнения баланса вод в гидросфере, представляющей собой систему взаимодействующих резервуаров, состоящих из океана, атмосферы, криосферы и вод суши, изменения УМО можно представить в виде:

$$\Delta h_M = A_M^{-1} (-\Delta V_K - \Delta V_{\text{Л}} + \Delta V_{\text{стер}}), \quad (2)$$

где Δh_M — внутригодовые изменения УМО; A_M — площадь Мирового океана (МО); ΔV_K — изменения массы воды криосферы; $\Delta V_{\text{Л}}$ — изменения запасов поверхностных и подземных вод суши.

Именно данное уравнение используется в зарубежных исследованиях по оценке вкладов разных факторов в изменения УМО. Обобщение полученных результатов приводится в Оценочных отчетах межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), а также представлено в коллективной монографии [27].

Другой подход, развиваемый в РГГМУ, состоит в том, что оценка вкладов различных факторов осуществляется с использованием уравнения пресноводного баланса Мирового океана как сумма эвстатических и стерического факторов. Исходя из этого, имеем:

$$\Delta h_M = A_M^{-1} (P_{MO} + M + I - E_{MO} + \Delta V_{стрп}), \quad (3)$$

где P_{MO} — осадки, выпадающие на акваторию МО; M — материковый (поверхностный и подземный) сток в МО; I — ледниковый сток в МО; E_{MO} — испарение с акватории МО.

Первый подход использует метод трендов, т.е. выполняется расчет за различные промежутки времени линейных трендов уровнеобразующих факторов и проводится последующее сравнение их суммы с фактическим трендом УМО. Понятно, что метод трендов адекватен лишь для монотонных рядов и позволяет весьма приближенно судить о вкладе отдельных факторов, ибо сильно зависит от величины тренда и вклада коэффициента детерминации тренда в дисперсию исходного процесса. Известно, что для коротких рядов величина тренда зависит от их длины и при ее изменении всего лишь на одно значение она может сильно меняться и даже изменять знак.

Обратимся теперь к обобщающим результатам многочисленных исследований по оценке вкладов различных факторов в тренд УМО, представленных в отчетах МГЭИК. Как видно из табл. 1, в XX столетии (1910–1990) суммарный вклад уровнеобразующих факторов (с учетом горных ледников) составил от $-0,8$ до $2,2$ мм/год при средней оценке $0,7$ мм/год [23]. Если же исключить из суммарного вклада оценку таяния горных ледников, то он вообще уменьшится до $0,4$ мм/год. Очевидно, эксперты МГЭИК допускают принципиальную ошибку, рассматривая таяние горных ледников в качестве вклада в изменения УМО. Таяние горных ледников, которое действительно весьма существенно, может давать непосредственный вклад в изменения УМО только с ледников, расположенных на островах в Северном Ледовитом океане, и возможно частично с территории Аляски, поэтому их вклад в рост УМО не превышает $0,1$ мм/год. Горные ледники, находящиеся в Европе, Азии, Африке и Ю. Америке, могут влиять на УМО, очевидно, только через приток речных вод к океану. Поэтому вряд ли следует непосредственно учитывать их вклад в тренд УМО. Так как реальный рост УМО, по данным наблюдений, составлял $Tr = 1,5$ мм/год, то имеем огромную невязку (дисбаланс) между рассчитанными и фактическими значениями тренда в УМО, превышающую вклад любого уровнеобразующего фактора.

Таблица 1

Вклады различных факторов в формирование тренда уровня Мирового океана по данным оценочных отчетов МГЭИК

Факторы, влияющие на УМО	Оценки тренда, мм/год			
	1910–1990 гг. [23]	1961–2003 гг. [22]	1993–2003 гг. [22]	1993–2010 гг. [21]
Термическое расширение	$0,51 \pm 0,20$	$0,42 \pm 0,12$	$1,6 \pm 0,5$	$1,1 (0,8–1,4)$
Ледники и ледниковые шапки	$0,30 \pm 0,09$	$0,5 \pm 0,18$	$0,77 \pm 0,22$	$0,76 (0,39–1,13)$
Гренландский ледниковый щит	$0,06 \pm 0,05$	$0,05 \pm 0,12$	$0,21 \pm 0,07$	$0,33 (0,25–0,41)$
Антарктический ледниковый щит	$-0,09 \pm 0,10$	$0,14 \pm 0,41$	$0,21 \pm 0,35$	$0,27 (0,16–0,38)$
Влагозапасы суши	$-0,07 \pm 0,78$	–	–	$0,38 (0,26–0,49)$
Сумма	$0,70 \pm 0,82$	$1,1 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,7$	$2,8 (2,3–3,4)$
Наблюдаемый уровень	$1,5 \pm 0,50$	$1,8 \pm 0,5$	$3,1 \pm 0,7$	$3,2 (2,8–3,6)$

Такими же значительными оказываются невязки и за другие промежутки времени. За период 1961–2003 гг. невязка без учета горных ледников составляет 1,0 мм/год, а для 1993–2003 гг. — 0,9 мм/год [22], за 1993–2010 гг. — 1,2 мм/год [21], причем по абсолютной величине они превышают вклад любого фактора формирования УМО. Большие сомнения вызывает и оценка значительного уменьшения запасов поверхностных и подземных вод на суше, вклад которых за 1993–2010 гг. в тренд УМО, по данным [21], составил 0,38 мм/год и превышает даже вклад ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии. Это обязательно должно проявляться в резком росте материкового стока в МО. Однако исследования отечественных ученых данный факт не подтверждают [1, 3]. Поэтому мы можем уверенно утверждать, что использование зарубежными исследователями уравнения баланса массы воды в гидросфере для оценки тренда УМО вряд ли оправданно, ибо требует знания большого числа разных весьма трудно определяемых факторов, точность величин которых во многих случаях даже невозможно проконтролировать.

По мнению автора, для оценки роли разных факторов в формировании тренда УМО следует использовать уравнение (3), компоненты которого определить проще, чем компоненты уравнения (2), причем точность их можно проконтролировать [8]. В работе [17] выполнена оценка межгодовой изменчивости испарения, осадков, их разности на основе данных реанализа CDAS (Climate Data Assimilation System) за период глобального потепления (1980–2006). Для временных рядов осадков и испарения характерен ярко выраженный положительный тренд, описывающий более 50 % дисперсии (табл. 2). Величина тренда для осадков над Мировым океаном составляет $Tr = 4,2$ мм/год, а для испарения $Tr = 3,6$ мм/год, соответственно тренд в эффективном испарении оказывается отрицательным. Вследствие этого в течение 1980–2005 гг. происходил рост УМО со скоростью 0,6 мм/год, что соответствует $217 \text{ км}^3/\text{год}$. Корреляция рядов испарения и осадков с глобальной температурой воздуха составляет соответственно $r = 0,82$ и $r = 0,80$.

Таблица 2

Характеристики линейного тренда в межгодовых колебаниях испарения и осадков над отдельными океанами и Мировым океаном в целом за период 1980–2005 гг. по данным [17]

Океан	Площадь, 10^6 км^2	Испарение		Осадки		Эффективное испарение	
		R^2	Tr , мм/год	R^2	Tr , мм/год	R^2	Tr , мм/год
Атлантический	42	0,56	3,5	0,58	4,4	0,11	-0,9
Индийский	75	0,58	4,5	0,55	5,3	0,10	-0,9
Тихий	180	0,63	3,3	0,47	3,7	0,03	-0,4
Мировой	362	0,78	3,6	0,79	4,2	0,16	-0,6

На рис. 3 представлен глобальный приток речных вод к МО. В целом за период 1921–2005 гг. отмечается рост суммарного стока речных вод со скоростью $17 \text{ км}^3/\text{год}$. Однако до 1980 г. тренд практически отсутствовал и только начиная с 1980 г. отмечается рост притока речных вод, равный $55 \text{ км}^3/\text{год}$ или в пересчете на УМО — $0,15 \text{ мм/год}$. Рост материкового стока в период интенсивного потепления объясняется интенсивным таянием горных ледников и пополнением речного стока их талыми водами. Если бы

отмечалось сильное уменьшение запасов вод суши (см. табл. 1), то рост стока должен быть значительно больше.

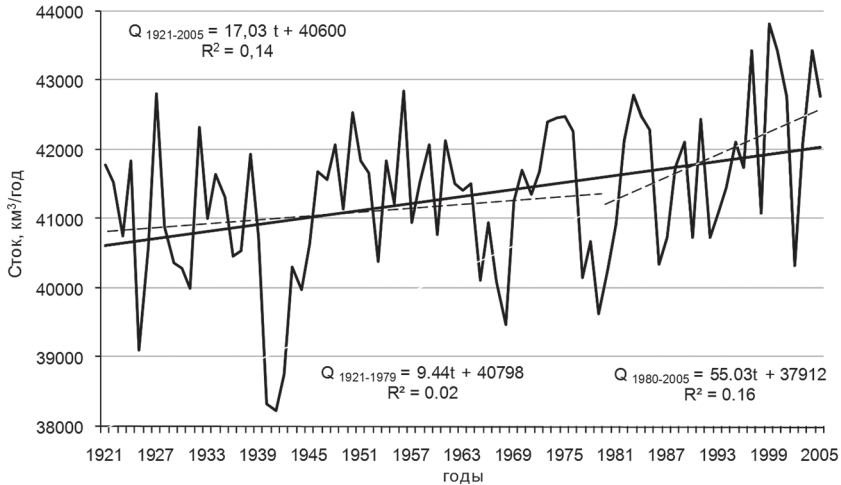


Рис. 3. Межгодовой приток речных вод к Мировому океану за 1921–2005 гг. по данным [1]

Для оценки ледового стока использовались результаты спутникового мониторинга антарктических айсбергов, осуществляемого Национальным Ледовым Центром США за период с 1978 по 2005 г. Было установлено, что число откалывающихся от ледникового щита Антарктиды айсбергов увеличилось примерно в 5 раз, т.е. скорость роста числа айсбергов составляет 1,7 в год. Это соответствует тренду в межгодовых колебаниях объема воды в ледниковом стоке равному $Tr = 77,5 \text{ км}^3/\text{год}$ или в пересчете на уровень океана — 0,22 мм/год.

Выполненные в РГГМУ исследования различных уровнеобразующих факторов позволили осуществить сравнение фактического и вычисленного тренда УМО для двух промежутков времени (1980–2005 и 1993–2003 гг.), которое представлено в табл. 3. При этом вычисленный тренд УМО определялся в виде суммы трендов эвстатической и стерической компонент. Нетрудно видеть, что невязка в расчетах составляет соответственно 0,21 и 0,22 мм/год. Это более чем в три раза меньше, чем в отчетах МГЭИК, если в последних не учитывать вклад горных ледников.

Очевидно, оценки трендов факторов, обуславливающих изменения УМО, целесообразно разделить на три категории. Относительно точные оценки трендов могут быть получены для суммарного притока пресных вод с материков, айсбергового стока с материковых щитов Антарктиды и Гренландии на основе дистанционных измерений с ИСЗ. С меньшей точностью рассчитываются тренды в характеристиках вертикального влагообмена. Наконец, наиболее сложными и в то же время вызывающими наименьшую степень доверия являются тренды в стерических колебаниях уровня, вклад которых в колебания УМО в современных условиях потепления климата весьма значителен. Отметим, что в РГГМУ разработана не имеющая аналогов физико-статистическая

модель оценки стерических колебаний УМО по ограниченному числу точек температуры поверхностного слоя океана [2, 12].

Таблица 3

Оценки вклада различных факторов в формирование тренда УМО за 1980–2005 и 1993–2003 гг. с использованием уравнения пресноводного баланса Мирового океана, мм/год

Источник роста УМО	1980–2005 гг.	1993–2003 гг.
Стерические колебания уровня океана	0,30	1,60
Суммарный сток с Гренландии	0,14	0,22
Твердый сток с Антарктиды	0,24	0,44
Приток материковых вод	0,16	0,19
Вертикальный влагообмен (осадки минус испарение)	0,62	0,43
Суммарный вклад факторов	1,56	2,88
Рост УМО по данным наблюдений	1,79	3,10
Дисбаланс (невязка)	0,23	0,22

Более точным способом оценки вкладов уровнеобразующих факторов в изменчивость УМО является дисперсионный анализ на основе модели множественной линейной регрессии (МЛР), который кроме тренда дополнительно учитывает циклические и случайные колебания. Запишем модель МЛР в виде:

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad (4)$$

где y_i — приращение УМО в i -й год (Δh_{M_i}); x_{ij} — значение j -й компоненты уравнения (2) или (3) в i -й год; m — число компонент; ε_i — ошибка (невязка) модели (4), которая определяется как разность между фактическими и вычисленными по уравнениям (2) или (3) значениями Δh_{M_i} в i -й год. В этом случае сумма слагаемых в правой части (4) всегда будет равна фактической величине Δh_{M_i} . Далее методом наименьших квадратов рассчитываются все параметры модели МЛР. В результате получаем коэффициент детерминации модели равный $R^2 = 1$. Перейдем от коэффициентов регрессии b_j к их стандартизованным аналогам β_j , определяемым по формуле $\beta_j = b_j(\sigma_x/\sigma_y)$, где σ_x — стандартное отклонение переменной x_j , а σ_y — стандартное отклонение переменной y_j . В этом случае стандартизованное уравнение МЛР примет вид:

$$z_y = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_m z_m = \sum \beta_j z_j, \quad (5)$$

где z_y, β_j, z_j — стандартизованные значения функции отклика, коэффициентов регрессии и предикторов соответственно. Коэффициент детерминации функции отклика может быть представлен как:

$$R^2 = \sum \beta_j r_{yj} = \beta_1 r_{y1} + \beta_2 r_{y2} + \dots + \beta_m r_{ym}, \quad (6)$$

где r_{yj} — парный коэффициент корреляции между предиктантом и j -м предиктором.

Отсюда следует, что произведение $\beta_j r_{ij}$ представляет собой вклад каждого из предикторов X_j в описание изменчивости функции отклика. Отметим, что данный способ оценивания вкладов уровнеобразующих факторов ранее в расчетах использовался только для Каспийского моря [9].

Рассмотрим теперь использование предложенного подхода применительно к уравнению (3). Зададим значения Δh_{M_i} в виде разности между январскими значениями УМО последующего и текущего годов, т.е. $\Delta h_{M_i} = h_{M1(i+1)} - h_{M1i}$. Результаты выполненных расчетов за период 1980–2005 гг. приводятся в табл. 4. Отметим, что величина невязки характеризует суммарный вклад ошибок отдельных факторов и неучитываемых в уравнении (3) слагаемых. Как следует из табл. 4 коэффициент β_j по абсолютной величине преобладает в компонентах вертикального влагообмена, причем роль осадков в колебаниях УМО заметно выше испарения. Вклад невязки более чем в два раза меньше компонент вертикального влагообмена. Практически не оказывают влияние на изменчивость УМО остальные факторы. Однако если рассматривать вклад факторов в долях от дисперсии УМО, то получаем несколько иную картину. Вклад эффективного испарения составляет 34 %, невязки — 38 %, стерических колебаний — 15 %, притока речных вод — 9 %, айсбергового стока с Антарктиды — 4 %. Итак, по сравнению с анализом трендов, который позволяет оценить лишь *средние* вклады отдельных уровнеобразующих факторов, статистическая модель непосредственно описывает *изменчивость* исходного процесса.

Таблица 4

**Оценки стандартизованных коэффициентов β_j и вклада отдельных факторов
в описание изменчивости функции отклика z_j**

Компонента	Оценка коэффициента β_j модели (5)	Вклад в изменчивость УМО, %
Испарение	-4,88	-60
Осадки	5,42	94
Приток речных вод	0,48	09
Айсберговый сток с Антарктиды	0,31	04
Стерические колебания	0,36	15
Невязка	2,02	38

О возможных изменениях уровня Мирового океана

В РГГМУ впервые разработан комплекс методов долгосрочного прогноза УМО: на длительную перспективу (столетие), на ближнюю перспективу (несколько десятилетий) и на текущий период (несколько лет). Такое деление обусловлено, с одной стороны, физическими закономерностями колебаний УМО и влиянием на них уровнеформирующих факторов, а с другой — практическими запросами потребителей. На длительную перспективу (на конец XXI в.) предложена простая статистическая модель прогноза УМО [19]. Она основана на использовании результатов моделирования глобальной температуры воздуха (ГТВ) с помощью комплекса численных моделей

общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). В результате сравнения за период 1960–2008 гг. глобальных оценок аномалий ГТВ и значений УМО, рассчитанного по футшточным (береговым) наблюдениям, было показано наличие между ними хорошо выраженной линейной зависимости. Это позволило рассчитать линейную статистическую модель, которая описывает 73 % дисперсии УМО.

Для 6 основных сценариев изменений климата при задании по комплексу из 16 климатических моделей вероятного диапазона роста температуры на конец 2090–2099 гг. [22] по статистической модели определен вероятный диапазон роста УМО на конец 2090–2099 гг. Сравнение прогнозных данных УМО на конец XXI в. по статистической модели и по комплексу МОЦАО показало почти полное соответствие (табл. 5). Очевидное ее достоинство состоит в том, что она требует минимум исходной информации, но при этом не уступает в точности сложным и дорогостоящим МОЦАО. Это означает, что в приближенных прогностических расчетах УМО на перспективу вполне обоснованно можно обойтись без использования МОЦАО.

Таблица 5

Возможные оценки изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха и уровня Мирового океана на конец XXI в. (2090–2099) по сравнению с концом XX в. (1980–1999)

Сценарий выбросов СДСВ	Ансамбль из 16 моделей общей циркуляции атмосферы и океана [22]		Статистическая модель [19]
	Вероятный диапазон роста температуры на конец 2090–2099 гг., °С	Вероятный диапазон роста УМО на конец 2090–2099 гг., м	Вероятный диапазон роста УМО на конец 2090–2099 гг., м
Сценарий В1	1,1–2,9	0,18–0,38	0,12–0,31
Сценарий А1Т	1,4–3,8	0,30–0,45	0,15–0,41
Сценарий В2	1,4–3,8	0,20–0,43	0,15–0,41
Сценарий А1В	1,7–4,4	0,21–0,48	0,18–0,47
Сценарий А2	2,0–5,4	0,23–0,51	0,21–0,58
Сценарий А1FI	2,4–6,4	0,26–0,59	0,26–0,68

Впервые предложена и разработана также не имеющая аналогов в зарубежных исследованиях физико-статистическая модель межгодовых колебаний уровня Мирового океана в целях его долгосрочного прогноза с заблаговременностью два десятилетия [16]. В ее основе лежит сформулированная выше концепция, что именно изменения ГТВ являются важнейшим определяющим фактором колебаний УМО. Было экспериментально установлено наличие длительного запаздывания (20 и 30 лет) колебаний УМО относительно изменений ГТВ. Это позволяет использовать процедуру сдвиговой пошаговой множественной регрессии для определения оптимальных моделей колебаний УМО в зависимости от значений температуры воздуха, заданных в узлах сеточной области над океаном. По зависимой выборке (1901–1999) рассчитан полный комплекс пошаговых моделей для сдвигов от $\tau = 0$ до $\tau = 33$ лет методом включения переменных до 15 предикторов, в результате чего общее число моделей составило более 500. Их анализ позволил установить сдвиг $\tau = 21$ год, для которого влияние ГТВ на колебания УМО проявляется максимальным образом. В результате этого оказалось

возможным выполнить расчет прогностических оценок УМО до 2028 г. (рис. 4). Величина тренда за указанный период составляет $Tr = 3,0$ мм/год, что удовлетворительно соответствует альтиметрической оценке тренда УМО (2,9–3,0 мм/год) для начала XXI в. Проверка полученных результатов была осуществлена путем построения аналогичных физико-статистических моделей для временных рядов УМО, взятых из работ [20, 24], которая показала их хорошее соответствие.

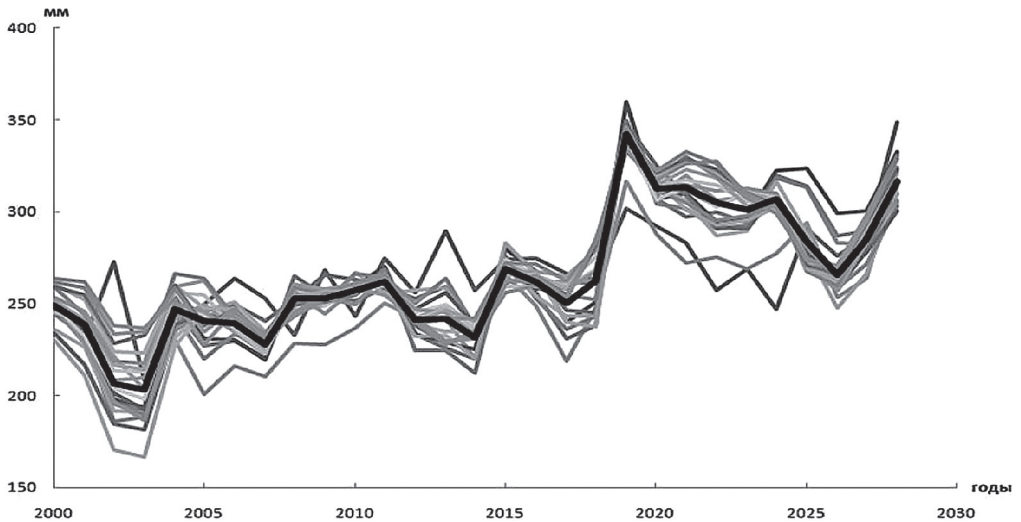


Рис. 4. Прогностические значения УМО за период 2000–2028 гг., рассчитанные по статистической модели для различного числа переменных от $m = 1$ до $m = 19$ [16] (жирная линия — осредненная кривая по 19 значениям УМО за каждый год)

Формирование тренда в современных изменениях глобальной температуры воздуха

По мнению экспертов МГЭИК «в высшей степени вероятно (*extremely likely*, 95–100 %), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX-го столетия» [21]. Однако с этим выводом трудно согласиться. В общем случае межгодовую изменчивость глобальной температуры воздуха можно рассматривать в виде аддитивной модели, состоящей из линейного тренда, циклических компонент и случайных колебаний, т.е.

$$ГТВ = Tr_{ГТВ} + C_{ГТВ} + P_{ГТВ}. \quad (7)$$

По сути, именно тренд идентифицируется как глобальное потепление. Исходя из данных архива реанализа HadCRUT и приняв за начало отсчета 1880 г., в работе [14] был выделен мощный линейный тренд, а с помощью вейвлет-анализа — 60-летний, 20-летний и 9–11-летний циклы. Дисперсионный анализ позволил оценить их вклад в дисперсию исходного временного ряда глобальной температуры $D(ГТВ)$.

В результате получаем уравнение (7) в дисперсионном виде:

$$D(\text{ГТВ}) = D(\text{Tr}) + D(C_{60}) + D(C_{20}) + D(C_{10}) + D(P) = 0,64 + 0,12 + 0,03 + 0,02 + 0,19.$$

Итак, вклад тренда, который идентифицируется как глобальное потепление, составляет 64 %, 60-летнего цикла — 12 %, на долю случайных колебаний приходится 19 %.

Безусловно, 60-летний цикл требует к себе внимания и не может быть проигнорирован. К сожалению, вопрос о его происхождении до настоящего времени остается дискуссионным. Более того, со статистической точки зрения данный цикл может быть признан недостоверным, ибо укладывается в длину ряда всего дважды, что позволяет формально его интерпретировать как результат наложения случайных колебаний друг на друга. Однако межгодовой ход ГТВ в настоящее время подтверждает существование 60-летнего цикла. Если в 2000 г. отмечался его очередной максимум, то тогда в 2030 г. следует ожидать минимум. Некоторый спад ГТВ после 2000 г. свидетельствует в пользу этого цикла [15].

Как известно, парниковый эффект (ПЭ) можно считать важнейшим фактором современных изменений глобального климата. Также известно, что главным парниковым газом является водяной пар. В среднем вклад влагосодержания атмосферы (ВА) в ПЭ составляет примерно 50 %, облачности — 25 %, углекислого газа — только 20 %. Суммарный вклад всех остальных газов в ПЭ не превышает 5 %. Таким образом, на долю атмосферной влаги приходится 75 % вклад в ПЭ. Несмотря на, казалось бы, очевидные вещи, с подачи МГЭИК происходит игнорирование роли ВА в современных изменениях климата и считается, что ВА является только их *откликом*.

На рис. 5 приводится межгодовой ход влагосодержания атмосферы над Мировым океаном, вычисленный по спутниковым данным за период 1988–2012 гг. [13]. Нетрудно видеть постепенный рост ВА, который характеризуется положительным линейным трендом $Tr = 0,33$ мм/10 лет. В колебаниях глобальной температуры воздуха и других параметрах климата также присутствуют хорошо выраженные тренды. Возникает вопрос их сравнимости. В работе [13] для этой цели вводится индекс тренда, представляющий собой безразмерное отношение размаха тренда к его среднему значению и выражаемый в процентах, т.е.

$$I_{Tr} = \frac{a_1 \cdot n}{\bar{x}} 100\%,$$

где a_1 — угловой коэффициент (величина) тренда; n — длина временного ряда ($n = 25$ лет); \bar{x} — среднее значение тренда.

По сути, индекс тренда — некий аналог коэффициента вариации, используемого для сравнения изменчивости характеристик, имеющих разную размерность. В результате расчетов было показано, что для ВА индекс тренда составляет 2,82 %, в то время как для температуры воздуха над Мировым океаном — 1,23 %, т.е. он выше более чем в 2 раза. Поэтому утверждения экспертов МГЭИК о малой изменчивости водяного пара в атмосфере безосновательны. При этом главным фактором формирования межгодовых колебаний ВА являются процессы вертикального влагообмена океана

с атмосферой, влияние которых на формирование тренда во ВА существенно выше температуры воздуха.

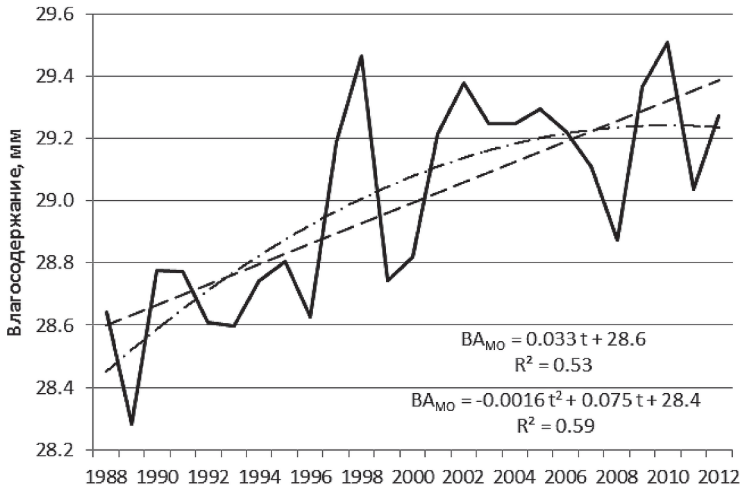


Рис. 5. Межгодовая изменчивость усредненного над Мировым океаном влагосодержания атмосферы за период 1988–2012 гг. и его линейный и нелинейный тренды по данным [13]

Кроме того, в работе [13] предложена простая статистическая модель, позволяющая рассчитывать ГТВ по влагосодержанию атмосферы над Мировым океаном. Расчет по этой модели тренда ГТВ показал, что он полностью согласуется с фактическим трендом ГТВ. Однако принимая во внимание положительную обратную связь между ВА и ГТВ сложно утверждать, что является причиной, а что следствием. Очевидно, при повышении температуры воздуха происходит увеличение влагосодержания, что, в свою очередь, через парниковый эффект ведет к росту температуры. Отсюда следует определенный дуализм в «поведении» атмосферного водяного пара, который является не только откликом на изменения климата, но и непосредственно *климатообразующим фактором*.

На наш взгляд, формирование глобального потепления обусловлено процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причем положительные связи преобладают. Довольно подробный их анализ дается в работе [6]. Так, положительные обратные связи существуют у глобальной температуры воздуха с температурой поверхности Мирового океана, его теплосодержанием, испарением, влагосодержанием атмосферы, содержанием в атмосфере углекислого газа и др. Отрицательная обратная связь отмечается между температурой воздуха и ледовитостью Арктического бассейна. При повышении температуры ледовитость уменьшается, что приводит к уменьшению альбедо, увеличению площади чистой воды, свободной ото льда, увеличению эмиссии парникового газа метана в шельфовой зоне океана. В свою очередь, это способствует повышению температуры воздуха.

Допустим, например, что под действием каких-либо климатообразующих факторов первоначальный положительный импульс получает температура воздуха. Это неминуемо сказывается на повышении поверхностной температуры воды океана и его теплоемкости, повышении уровня Мирового океана, повышении испарения, увеличении влагосодержания атмосферы, дополнительной эмиссии CO_2 в атмосферу, уменьшении ледовитости Северного Ледовитого океана и понижении его альбедо, таяния ледников и вечной мерзлоты, вследствие чего в атмосферу выделяется метан, который во много раз более сильный парниковый газ, чем CO_2 . Все это, в конечном счете, определяет последующее нагревание атмосферы. Если климатообразующие факторы носят циклический характер, то по мере получения температурой воздуха отрицательного импульса процессы крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы начнут развиваться в обратном направлении и будет происходить похолодание климата.

Однако если климатообразующий фактор действует монотонно в одном направлении, причем постоянно усиливается, то он, естественно, будет влиять на формирование трендовой составляющей в изменениях климата. Таким фактором является совокупность всех видов антропогенной деятельности, наиболее важным из которых служит сжигание ископаемого топлива и выбросы в атмосферу парниковых газов и, прежде всего, CO_2 . Атмосферное «покрывало» из парниковых газов стимулирует рост температуры через механизмы прямых и обратных связей в системе океан–атмосфера. По сути, человеческую деятельность можно рассматривать в виде своеобразного спускового механизма мощных процессов в системе океан–атмосфера, который приводит их в действие и одновременно не допускает самокомпенсации. Однако это не означает, что она играет преобладающую роль в глобальном потеплении. Более правильно сказать, что она является его стимулятором [10].

Таким образом, формирование современного глобального потепления обусловлено процессами крупномасштабного взаимодействия между МО и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причем положительные связи преобладают. Главенствующая роль в этом принадлежит положительной обратной связи между температурой воздуха и влагосодержанием атмосферы. С одной стороны, с повышением глобальной температуры воздуха происходит некоторый рост ВА, с другой — рост ВА через парниковый эффект ведет к росту температуры. Поэтому однонаправленное совместное действие крупномасштабного взаимодействия процессов в системе океан–атмосфера и антропогенного фактора — это, возможно, наиболее реальный механизм современного потепления климата, т.е. формирования тренда в глобальной температуре воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00837).

Литература

1. Бабкин В.И., Клизе Р.К. Приток речных вод в Мировой океан. // Учёные записки РГГМУ, 2009, № 13, с. 17–20.
2. Глок Н.И., Малинин В.Н. Статистический анализ стерических колебаний уровня Мирового океана. // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 21, с. 126–136.
3. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. — М.: «ГЕОС», 2011. — 660 с.

4. *Клиге Р.К.* Изменения глобального водообмена. — М.: «Наука», 1985. — 247 с.
5. *Клиге Р.К., Данилов И.Д., Конищев В.Н.* История гидросферы. — М.: «Научный мир», 1998. — 368 с.
6. *Малинин В.Н.* Уровень океана: настоящее и будущее. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 260 с.
7. *Малинин В.Н.* Глобальный водный баланс. — Lambert Academic Publishing, 2011. — 158 p.
8. *Малинин В.Н.* Влагообмен в системе океан—атмосфера. — Л.: Гидрометеиздат, 1994. — 197 с.
9. *Малинин В.Н.* Проблема прогноза уровня Каспийского моря. — СПб.: РГГМУ, 1994. — 160 с.
10. *Малинин В.Н.* К анализу тренда в уровне Мирового океана. // Изв. РГО, 2010, № 142, вып. 5, с. 1–9.
11. *Малинин В.Н., Глок Н.И.* Использование спутниковых данных о поверхностной температуре воды для оценки стерических колебаний уровня Мирового океана. // Исследование Земли из космоса, 2014, № 3, с. 27–32.
12. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным. // Исследование Земли из космоса, 2015, № 1, с. 3–11.
13. *Малинин В.Н.* Влагосодержание атмосферы и парниковый эффект. // Общество. Среда. Развитие, 2014, № 3, с. 139–145.
14. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* О современных изменениях глобальной температуры воздуха. // Общество. Среда. Развитие, 2011, № 2, с. 215–221.
15. *Малинин В.Н., Шевчук О.И.* Об изменениях глобального климата в начале 21-го столетия. // Учёные записки РГГМУ, 2010, № 15, с. 150–154.
16. *Малинин В.Н., Шевчук О.И.* О возможных изменениях уровня Мирового океана в ближайшие десятилетия. // Общество. Среда. Развитие, 2009, № 2, с. 172–180.
17. *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.
18. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И.* Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет. // Учёные записки РГГМУ, 2007, № 4, с. 125–132.
19. *Малинина Ю.В.* К оценке возможного ущерба от возможного повышения уровня океана в XXI столетии. // Учёные записки РГГМУ, 2010, № 14, с. 162–176.
20. *Church J.A., White N.J.* A 20th century acceleration in global sea-level rise. // Geophysical Res. Letters, 2006, vol. 33, no. 1.L01602.
21. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. T.F. Stocker et al. — Cambridge (UK), N. Y., Cambridge University Press, 2013. — 1535 p.
22. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007. Eds. L. Bernstein et al. — Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2007. — 940 p.
23. IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. J.T. Houghton et al. — Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2001. — 881 p.
24. *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.
25. Mean Sea Level as seen by other techniques. AVISO. — Электронный ресурс: [<http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/other-techniques/index.html>].
26. Sea Level change. University of Colorado at Boulder. — Электронный ресурс: [<http://sealevel.colorado.edu>].
27. Understanding Sea-level Rise and Variability. Eds. J.A. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup, W.S. Wilson. — Wiley-Blackwell, 2010. — 456 p.