

*О.И. Шевчук, В.Н. Малинин*

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПАРЕНИЯ НА УРОВЕНЬ МИРОВОГО ОКЕАНА

*O.I. Shevchuk, V.N. Malinin*

## INFLUENCE OF EFFECTIVE EVAPORATION AT SEA LEVEL

Обсуждается вклад эвстатических факторов в межгодовые колебания уровня Мирового океана (УМО). Рассматривается межгодовая изменчивость испарения, осадков и эффективного испарения для отдельных океанов. Приводятся оценки УМО за период с 1981 по 2011 годы, рассчитанные с помощью модели по данным об эффективном испарении с поверхности океанов.

Ключевые слова: испарение, осадки, эффективное испарение, уровень Мирового океана, прогноз.

*Contribution of eustatic factors into interannual variations of Sea level is discussed. Interannual variability of evaporation, precipitation and effective evaporation is considered for specific oceans. Sea level assessments for 1981-2011 are provided based on sea surface effective evaporation data model.*

*Kew words: evaporation, precipitation, effective evaporation, sea level, forecast.*

В общем случае изменения уровня Мирового океана ( $\Delta h_M$ ) можно представить в виде суммы эвстатической ( $\Delta h_Э$ ), стерической ( $\Delta h_C$ ) и деформационной ( $\Delta h_D$ ) компонент, т.е.

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

Однако роль отдельных компонент в суммарных колебаниях уровня Мирового океана (УМО) существенно различна. 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, имеющие разный знак в различных регионах Земли, нивелируют друг друга. Что касается донного осадконакопления, то оно способствует повышению УМО, однако его величина для масштабов времени не превышающих нескольких десятков лет, является пренебрежимо малой [1,2]. Таким образом, изменения уровня Мирового океана на современном этапе обусловлены суммой эвстатических и стерических факторов.

Из эвстатических факторов очевидно, наибольшее влияние на УМО оказывают испарение и осадки [2]. В работах [3,4] уже были рассчитаны ряды по осадкам и испарению практически для всего Мирового океана (МО), но длина их была ограничена 2005 годом. В настоящее время появилась возможность дополнить и уточнить полученные ранее результаты. Поэтому было осуществлено новое осреднение исходных

данных по осадкам и испарению с 1980 по 2010 гг. в центры пятиградусных трапеций МО на основе архива «реанализа» [5].

Сопоставление зонально-осредненных значений испарения и осадков по данным архива CDAS с их средними оценками, полученными преимущественно климатологическими методами [6] показывает, что систематическое занижение составляет 17 – 26 % для испарения и 18 – 25 % для осадков, что соответствует ранее полученным результатам.

Для Мирового океана величина тренда за период 1980-2010 гг. для осадков составляет  $Tr = 2.6$  мм/год, а для испарения –  $Tr = 2.4$  мм/год. Очевидно, что главной причиной возникновения этих трендов является достаточно интенсивное потепление климата в рассматриваемый период времени которое характеризуется трендом в глобальной температуре воздуха равным  $Tr = 0,18$  °C ΔT/10лет [7]. Действительно, корреляция глобальной температуры воздуха с рядами испарения и осадков для МО, составляющая соответственно  $r_{E,T} = 0.83$  и  $r_{P,T} = 0.76$ , подтверждает это.

Поскольку количество выпавших осадков над МО растет быстрее испарения, то тренд в эффективном испарении ( $E_{эф} = E - P$ ) оказывается отрицательным. Наибольшая величина его отмечается для Атлантического и Индийского океанов. Для Тихого океана тренд незначим по критерию Стьюдента. Величина тренда в межгодовом ходе эффективного испарения для МО в целом составляет  $Tr = -0.16$  мм/год. Соответственно, уменьшению эффективного испарения на 0.16 мм/год соответствует увеличение УМО на 0.16 мм/год или на 58 км<sup>3</sup>/год.

Естественно, наличие тренда во всех рядах существенно увеличивает степень временной связности рядов испарения и осадков. Так, корреляция между этими компонентами для МО составляет  $r_{E,P} = 0.94$ , а после исключения трендов  $r_{E,P} = 0.86$ . Примерно также обстоит дело с корреляцией между испарением и осадками для отдельных океанов (табл. 1). Максимальная корреляция после исключения трендовой компоненты отмечается для Индийского океана, а минимальная – для Атлантического океана. Испарение над МО наиболее тесно связано с испарением над Тихим океаном, а осадки над МО – с осадками над Индийским океаном. Наиболее обособленно во времени изменяются компоненты влагообмена над Тихим океаном. Очевидно, это обусловлено размерами океана, вследствие чего даже крупномасштабные гидрометеорологические процессы над ним имеют значительно большую степень самостоятельности, чем над другими океанами [8].

Межгодовая изменчивость испарения и осадков над отдельными океанами и МО в целом примерно одинакова и невелика, коэффициент вариации составляет  $C = 0.2 - 0.4$ . Значительно более высокой оказывается изменчивость  $E_{эф}$ , так как его средние значения существенно меньше средних значений  $E$  и  $P$ . Наибольший коэффициент вариации отмечается для Тихого океана при  $C = 0.96$ . Для МО в целом  $C = 0.10$ . Заметим, что он значительно больше коэффициента вариации притока пресных вод к МО, который по данным [9] равен  $C = 0.02$ .

Таблица 1

Распределение коэффициентов корреляции между испарением и осадками для отдельных океанов после исключения в рядах трендовой компоненты

Океан	Характеристика	Испарение над океаном			Осадки над океаном		
		Атлантический	Индийский	Тихий	Атлантический	Индийский	Тихий
Атлантический	Испарение	1.00	0.59	0.16	0.73	0.53	-0.11
	Осадки	0.73	0.65	0.23	1.00	0.69	-0.04
Индийский	Испарение	0.59	1.00	0.13	0.65	0.86	0.07
	Осадки	0.53	0.86	0.30	0.69	1.00	0.09
Тихий	Испарение	0.16	0.13	1.00	0.23	0.30	0.75
	Осадки	-0.11	0.07	0.75	-0.04	0.09	1.00
Мировой	Испарение	0.70	0.70	0.74	0.67	0.73	0.46
	Осадки	0.40	0.64	0.72	0.61	0.73	0.70

Если же рассматривать межгодовую изменчивость компонентов водного баланса в локальных районах океана, то можно отметить следующее. Заметное влияние на уровень океана приток пресных вод оказывает только в устьях крупных рек. Влияние айсбергового стока на уровень практически несущественно, поскольку таяние льда происходит постепенно. С учетом весьма медленных изменений стерического компонента, естественно полагать, что влияние компонентов вертикального влагообмена океана с атмосферой на межгодовые колебания УМО является значительным. В связи с этим представляет интерес выявление пространственной связности изменений уровня  $\Delta h_M$  со значениями  $E_{эф}$  в узлах сеточной области Мирового океана. Поскольку в нашем распоряжении были только средние годовые оценки УМО, то значения  $\Delta h_M$  определялись по центральным разностям:

$$\Delta h_{Mi} = \frac{h_{M(i+1)} - h_{M(i-1)}}{2}, \tag{2}$$

где  $h_{M(i+1)}$ ,  $h_{M(i-1)}$  – значения УМО в  $i+1$  и  $i-1$  годы соответственно.

Оценка пространственной связности осуществлялась на основе карт изокоррелят за промежуток времени с 1980 по 2009 г. Отчетливо выявляются хорошо выраженные локализованные очаги значимой связи между  $\Delta h_M$  и  $E-P$ . При этом зонам преобладания осадков над испарением, как правило, соответствует положительная корреляция, а зонам преобладания испарения над осадками, наоборот, отрицательная корреляция, что полностью отвечает физической сути связи. Максимальная корреляция при  $r_{\Delta h, E-P} = -0.64$  наблюдается в Тихом океане вблизи Гавайских островов

в точке с координатами  $\phi = 2,5$  ю.ш.,  $\lambda = 162,5$  з.д. Кроме того, наиболее значимые очаги положительной корреляции отмечаются также в Тихом океане – в области Алеутской депрессии и в районе действия Антарктического циркумполярного течения, а очаги отрицательной корреляции – в субтропическом районах Индийского океана восточнее о. Мадагаскар.

Эти результаты свидетельствуют о возможности построения линейной статистической модели  $\Delta h_{\text{М}}$  со значениями эффективного испарения в узлах сеточной области МО. Но поскольку число узлов значимой корреляции весьма велико и составляет 1529, то возникают вычислительные сложности при реализации модели пошаговой модели множественной регрессии. Поэтому вначале строились модели для каждого океана и отбирались наиболее значимые предикторы. В результате число предикторов было сокращено до 294. Затем методом включения переменных была построена обобщенная регрессионная модель, которая имеет очень высокую скорость сходимости. На 20-м шаге коэффициент детерминации  $R^2$  практически равен 1, стандартная ошибка модели равна нулю, причем все коэффициенты регрессии значимы на всех шагах по критерию Стьюдента. Принимая во внимание, что данная модель полностью описывает возможные ошибки функции отклика, то имеет смысл ограничиться ее анализом, например, только до 10 шага

$$\Delta h_{\text{М}} = a_0 + a_1 E_{\text{эф1}} + a_2 E_{\text{эф2}} + \dots + a_{10} E_{\text{эф10}}. \quad (3)$$

Параметры этой модели для некоторых шагов приведены в таблице 4. Нетрудно видеть, что уже на 10-м шаге стандартная ошибка становится вполне приемлемой с практической точки зрения, ибо она меньше 1 мм/год. На рисунке 1 дается распределение точек (узлов с оценками  $E-P$ ) по акватории МО с номерами, соответствующими их включению в модель (3). Отметим, что точки размещаются относительно равномерно по акватории Мирового океана за исключением Атлантического океана, причем в зоне АЦТ находится сразу три точки.

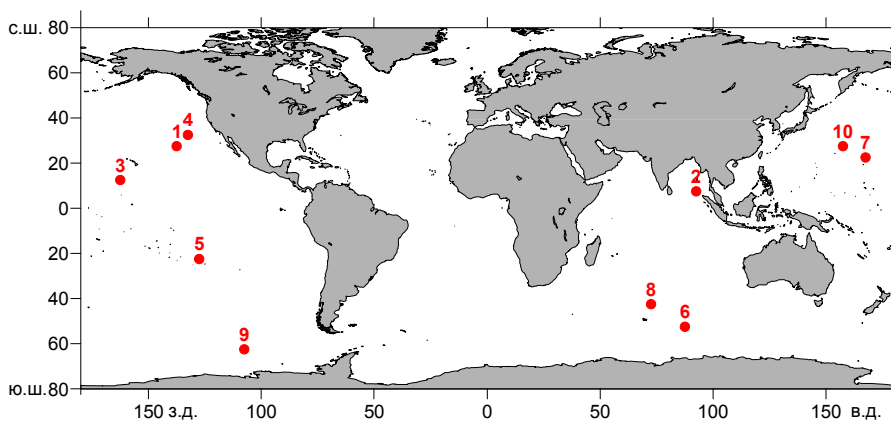


Рис. 1 — Распределение точек с эффективным испарением по акватории МО с номерами, соответствующими их включению в модель (3)

С помощью данной модели нетрудно вычислить оценки  $\Delta h_M$ , а затем и значения среднего годового УМО как  $h_{M(i+1)} = h_{M(i-1)} + 2\Delta h_{M_i}$ . Сравнение вычисленных для различных вариантов модели значений  $h_M$  с их фактическими значениями для расчетного 2008 года показывает очень малое расхождение для всех шагов модели, которое составляет менее 1 мм (таблица 2.)

Таблица 2

Оценки параметров модели (3) и линейного тренда УМО за период с 1981 по 2009 г.

Шаг модели	Коэффициент детерминации, R2	Стандартная ошибка модели, мм/год	Параметры линейного тренда УМО за 1981-2009 гг.		Расхождение вычисленного и фактического значения УМО за 2008 год, мм/год
			R2	Tr, мм/год	
3	0.64	3.2	0.82	1.97	0.26
10	0.98	0.78	0.80	2.00	0.02
12	0.99	0.62	0.81	1.98	0.56

Использование независимых значений  $E_{эф}$  за период с 2010 по 2011 годы позволило рассчитать значения УМО до 2011 года. Как видно из рис. 2, десятый и двенадцатый варианты модели дают очень близкие оценки УМО, в то время как третий шаг модели их несколько занижает. Об этом свидетельствует и более низкая оценка линейного тренда, равная  $Tr = 1.97$  мм/год. Узлы со значениями эффективного испарения и соответствующие им коэффициенты в модели (3), приводятся в таблице 3.

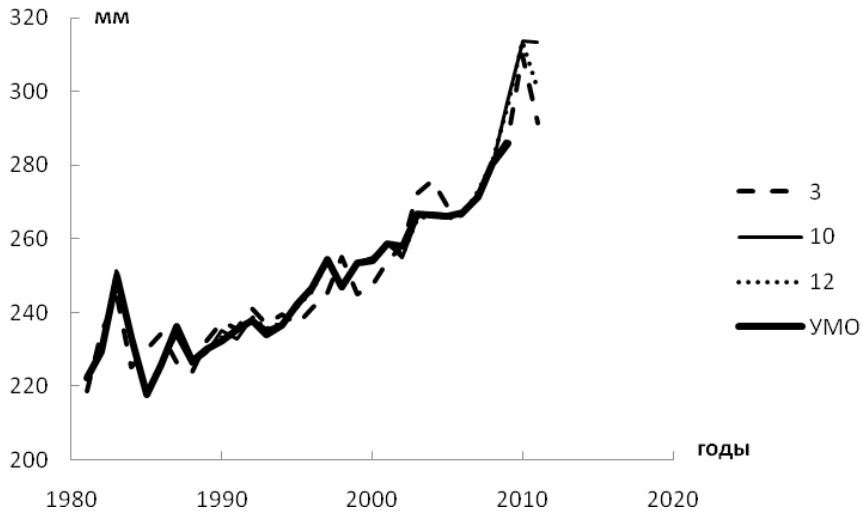


Рис. 2 — Изменения УМО за период с 1981 по 2011 г., рассчитанные по различным вариантам модели (3) по данным об эффективном испарении с поверхности океанов

Как следует из табл. 2, линейный тренд за период с 1981 по 2009 г. составил 2.0 мм/год, а по данным инструментальным наблюдений – 1.93 мм/год. Но поскольку

ку в последующие 2 года наблюдался резкий рост УМО, то и тренд тоже увеличился. Для статистической модели за период 1993-2010 гг. он составил 3.47 мм/год, что близко оценке тренда по альтиметрическим данным равным 3.26 мм/год [10]. Такое хорошее соответствие подтверждает достоверность полученных результатов и свидетельствует о возможности расчета изменений УМО по данным осадков и испарения в реперных точках Мирового океана.

Таблица 3

**Оценки коэффициентов и координаты узлов значений эффективного испарения в модели (3)**

Номер станции Свободный член	Оценка коэффициента 38.20	Широта	Долгота
1	0.07	27.5 с.ш.	137.5 з.д.
2	0.10	7.5 с.ш.	92.5 в.д.
3	- 0.09	12.5 с.ш.	162.5 з.д.
4	- 0.15	32.5 с.ш.	132.5 з.д.
5	0.06	22.5 ю.ш.	127.5 з.д.
6	0.43	52.5 ю.ш.	87.5 в.д.
7	0.10	22.5 с.ш.	167.5 в.д.
8	- 0.12	42.5 ю.ш.	72.5 в.д.
9	0.17	62.5 ю.ш.	107.5 з.д.
10	- 0.04	27.5 с.ш.	157.5 в.д.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П1223 от 07 июня 2010 г.) по направлению «Океанология».

### **Литература**

1. Малинин В.Н. О современном состоянии проблемы изменчивости вод гидросферы. – Ученые Записки РГГМУ, 2005, №1. с.54-75.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) WG1 Third Assessment Report. Chapter 11. Changes in Sea Level. (Editors V.C.Douglas, A.Ramirez), 2000, 76 p.
3. В.Н. Малинин, О.И. Шевчук. Эвстатические колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях // Изв. Рус. геогр. общества. 2008. Т.140. Вып.4. С. 20-30.
4. Клиге Р.К., Малинин В.Н., Шевчук О.И. Колебания уровня Мирового океана в XX столетии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. №1. С. 7-14
5. Kalnay, E. et al., 1996: The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project». Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-471.
6. Малинин В.Н. Влагообмен в системе океан-атмосфера. – СПб, Гидрометеоздат, 1994. – 198 с
7. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007 // Ed. by Bernstein L. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 940 p
8. Малинин В.Н. Изменчивость глобального водообмена в условиях меняющегося климата // Водные ресурсы. 2009, Т. 36, №1, с.1-14
9. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 638 с
10. Sea Level Change // University of Colorado at Boulder. URL: <http://sealevel.colorado.edu>