

ОКЕАНОЛОГИЯ**В.Н. Малинин, С.М. Гордеева, О.И. Шевчук****ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА
ЗА ПОСЛЕДНИЕ 140 ЛЕТ****V.N. Malinin, S.M. Gordeeva, O.I. Shevchuk****VARIABILITY OF THE GLOBAL SEA LEVEL
FOR THE PAST 140 YEARS**

Приводятся результаты реконструкции глобального уровня океана по данным футшточных наблюдений за последние 140 лет (1861 – 1999 гг.) и его оценки с 1993 г. по данным альтиметрических измерений. Обсуждаются главные закономерности его межгодовых колебаний и факторы их обуславливающие.

Given are the results of the reconstruction of global ocean level based on tide-gauge records over the past 140 years (1861-1999) and its estimation since 1993 year based on altimetric satellite determination data. The main regularities of its interannual fluctuations and their causal factors are discussed.

Изменения уровня Мирового океана можно рассматривать как важнейший индикатор глобального водообмена, перераспределяющего воды гидросферы между отдельными оболочками Земли и прежде всего между водами литосферы и криосферы [Малинин, 2005]. Одновременно с этим он тесно связан с современными колебаниями климата. Поэтому задача изучения долговременных колебаний и построения системы мониторинга уровня Мирового океана (УМО) представляется чрезвычайно актуальной.

Как известно, в настоящее время существуют две совершенно независимые системы измерения морского уровня. Это так называемые футшточные наблюдения на береговых станциях и альтиметрические измерения уровенной поверхности океана с ИСЗ. К сожалению, альтиметрические измерения начались только с конца 1992 г., поэтому анализ межгодовой изменчивости УМО за более ранний период возможен только на основе футшточных наблюдений. В связи с этим для оценки УМО нами использовались среднемесячные данные по уровню, хранящиеся в архиве Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), довольно подробные сведения о котором содержатся в работе [Woodworth, 2003].

Учитывая, что для архива PSMSL характерно наличие большого числа пропусков и неоднородность данных, предварительно из него были отобраны длиннорядные станции с минимальными пропусками [Шевчук, 2006]. В но-

вый архив вошло 230 станций, длина наблюдений за уровнем на которых превысила 30 лет, в том числе 89 станций с длиной наблюдений более 50 лет и 17 станций – более 100 лет. Естественно, что подавляющее большинство длиннорядных станций сосредоточено в Европе и Северной Америке (рис. 1), в то время как Южное полушарие почти не освещено данными наблюдений. Наиболее длинные ряды по уровню отмечаются на станциях Brest (48°23' с.ш., 4°30' з.д.), где начало стационарных наблюдений датируется 1807 г. и Swinoujscie (53°55' с.ш., 14°14' в.д.) с началом наблюдений в 1811 г.

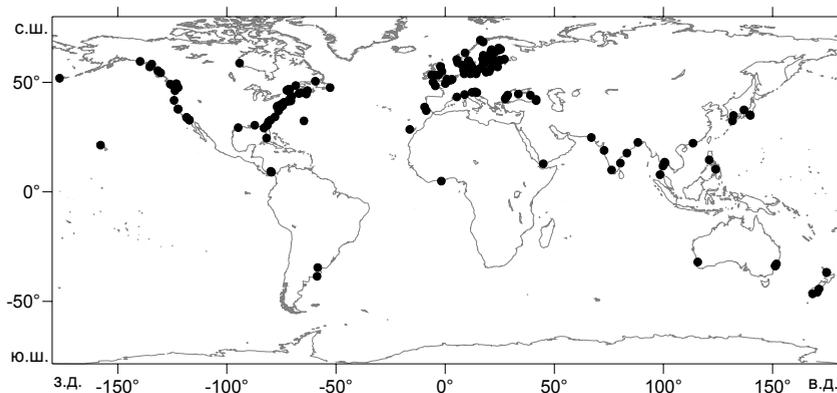


Рис. 1. Географическое расположение береговых станций наблюдений за морским уровнем с периодом наблюдений более 60 лет

Задача оценивания глобального уровня Мирового океана не сводится к простому арифметическому осреднению данных об уровне на исходных станциях в связи с тем, что подавляющее большинство их сосредоточено в Европе и Северной Америке. Кроме того, следует принимать во внимание уже отмеченное выше наличие большого числа пропусков в наблюдениях и очень малое число длиннорядных станций.

Поэтому вначале был выполнен анализ временных рядов УМО, рассчитанных разными авторами [Клиге, 1985; Barnett, 1984; Douglas, 1997; Fairbridge, 1962; Gornits, 1982] за различные, но не одинаковые промежутки времени. Как оказалось, они заметно отличаются друг от друга, причем очень сложно отдать предпочтение какому-либо одному из них. Чтобы сгладить возможные случайные ошибки, мы выполнили осреднение указанных рядов за общий период времени, а именно за период с 1901 по 1958 г. При этом для удобства обработки и сравнимости данных предварительно все ряды были приведены к единой системе отсчета, в качестве которой с целью удобства за начало отсчета была принята величина 100 мм в 1901 г. Полученный таким образом ряд УМО считался базовым.

Поскольку данный ряд имеет довольно короткую длину, то вполне естественно возникает задача его удлинения настолько, насколько это может позволить архив PSMSL. По-видимому, для решения данной задачи может быть

использован пошаговый метод множественной регрессии, который позволяет последовательно отбирать наиболее значимые факторы и подробно исследовать их статистическую значимость [Малинин, 2003]. Именно так могут быть выявлены станции с многолетними наблюдениями за морским уровнем, обеспечивающие минимальную ошибку восстановления глобального УМО с достаточной для практических целей точностью.

Отметим, что удлинение ряда УМО может быть осуществлено в обе стороны: после 1958 г. и до 1901 г. Рассмотрим вначале задачу удлинения УМО после 1958 г. В этом случае линейная модель для УМО ($h_{\text{УМО}}$) имеет вид:

$$h_{\text{УМО}} = f(h_1, h_2, \dots, h_m), \quad (1)$$

где m – число станций.

В состав предикторов были включены станции, на которых длина наблюдений за уровнем превышает 90 лет. В результате их общее число составило $m = 21$. При этом зависимая выборка составила 50 лет (с 1909 по 1958 г.). Коэффициенты модели множественной линейной регрессии находились с помощью метода включения переменных. Порядок модели (ее оптимальность) оценивался по минимуму среднеквадратической ошибки при условии значимости всех коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента и значимости модели по критерию Фишера (при уровне значимости 5 %). Было установлено, что оптимальной является модель, содержащая пять станций:

$$h_{\text{УМО}} = -2969,3 + 0,15 h_{156} + 0,17 h_{123} + 0,07 h_{138} + 0,12 h_{42} - 0,06 h_{21}. \quad (2)$$

В данном уравнении станции указаны в порядке их значимости, т. е. по вкладу в описание изменчивости исходного ряда $h_{\text{УМО}}$. Это New York (40°47' с.ш., 74°01' з.д.), Seattle (47°36' с.ш., 122°20' з.д.), Galveston (29°19' с.ш., 94°48' з.д.), Swinoujście (53°55' с.ш., 14°14' в.д.) и Ratan (64° с.ш., 20°55' в.д.). Уже первый коэффициент корреляции УМО со ст. New York достигает 0,91. Коэффициент детерминации данной модели равен $R^2 = 0,94$, т. е. модель описывает 94 % дисперсии функции отклика, а стандартная ошибка модели $\sigma_{y(x)} = 6,6$ мм/год.

Таким образом, на зависимых данных модель (2) с высокой точностью описывает изменчивость исходного ряда УМО. Приняв во внимание данное обстоятельство, нами был произведен расчет УМО на независимый промежуток времени с 1959 по 1999 г. В результате этого общая продолжительность временного ряда УМО возросла до 99 лет (с 1901 по 1999 г.).

Обратимся теперь к задаче расчета УМО назад от 1901 г. Прежде всего были отобраны 8 станций, для которых общее начало наблюдений за уровнем начинается с 1861 г. Общий конец наблюдений за уровнем датируется 1934 г. Таким образом, зависимая выборка имеет длину 34 года (с 1901 по 1934 г.). Использование аппарата пошаговой регрессии позволило установить, что оптимальной следует считать модель с пятью предикторами, имеющую вид

$$h_{\text{УМО}} = -1069,2 + 0,07 h_{52} - 0,33 h_{25} + 0,09 h_{42} + 0,09 h_{127} + 0,26 h_{26}. \quad (3)$$

В данное уравнение в порядке значимости входят следующие станции: Brest (48°23' с.ш., 4°30' з.д.), Lyokki (60°51' с.ш., 21°11' з.д.), Swinoujście (53°55' с.ш., 14°14' в.д.), San Francisco (37°48' с.ш., 122°28' з.д.), Lypyrtti (60°36' с.ш., 21°14' в.д.). Первый коэффициент корреляции УМО со ст. Brest равен $r = 0,63$, коэффициент детерминации данной модели равен $R^2 = 0,75$, стандартная ошибка модели $\sigma_{y(x)} = 6,5$ мм/год. При этом все коэффициенты регрессии значимы по критерию Стьюдента, а сама модель значима по критерию Фишера (при уровне значимости 5 %). Заметим, что хотя доля описания дисперсии УМО по данной модели существенно меньше по сравнению с моделью (2), однако оценки случайной ошибки $\sigma_{y(x)}$ практически одинаковы.

Межгодовой ход УМО за весь период времени (с 1861 по 1999 г.) приводится на рис. 2. Как и следовало ожидать, главной закономерностью колебаний УМО является наличие мощного линейного тренда. Его параметры приводятся в табл. 1. Средняя скорость роста уровня УМО за рассматриваемый промежуток времени составляет $Tr = 1,4$ мм/год, причем тренд описывает более 90 % дисперсии исходного ряда. Тем не менее в его межгодовом ходе довольно отчетливо выделяется несколько периодов с различным характером изменений УМО, для которых локальные тренды существенно различны. Это довольно быстрый рост УМО в период с 1861 по 1878 г. ($Tr = 2,4$ мм/год), затем в течение периода с 1879 по 1923 г. уровень практически не менялся, т.е. наблюдалась фаза почти стояния уровня ($Tr = 0,5$ мм/год), затем вплоть до 1999 г. он опять начал быстро расти ($Tr = 2,0$ мм/год). В течение XX столетия по нашим данным, величина тренда достигала почти 1,8 мм/год.

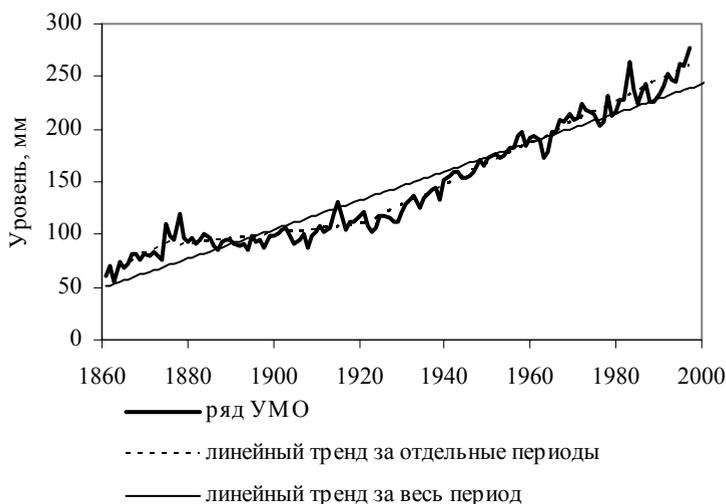


Рис. 2. Межгодовой ход УМО за весь период времени (с 1861 по 1999 г.).

Оценка параметров локальных линейных трендов
для различных промежутков времени для ряда УМО

Промежуток времени	Коэффициент детерминации, R^2	Величина тренда, Tr , мм/год	Среднее значение
1861 – 1877	0,69	2,00	79,1
1878 – 1923	0,34	0,45	100,4
1924 – 1999	0,96	1,97	189,5
1861 – 1999	0,92	1,39	146,5
1901 – 1999	0,96	1,79	170,2

Естественно, весьма важным является вопрос точности выполненной таким образом реконструкции временного ряда УМО. Эта возможность представилась буквально в последнее время. В только что опубликованных работах [Church, 2006; Jevrejeva, 2006] приводятся аналогичные ряды УМО, полученные с использованием всей базы PSMSL за длительные промежутки времени. Church et al. рассчитали УМО за период с 1870 по 2001 г., а Jevrejeva et al. вычислили УМО за еще более длительный промежуток времени (с 1807 по 2002 г.) с использованием 1023 станций архива PSMSL. Для сравнения этих рядов с приведенным выше на рис. 2 они были совмещены в 1901 г. на отметке 100 мм (рис. 3). Нетрудно видеть, что в целом наблюдается очень хорошее соответствие, особенно нашего ряда с работой [Church, 2006]. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты сравнения уровня для конечных промежутков рассматриваемого периода времени (табл. 2), где расхождения могут достигать максимальных значений. Так, в 1999 г. расхождение наших данных с работой [Church, 2006] составляет 5 мм, а в 1870 г. оно равно 6 мм. Что касается работы [Jevrejeva, 2006], то существенные различия с нашими данными отмечаются в XIX столетии. В 1861 г. они достигают почти 7 см. Однако в XX столетии эти различия незначительны. В 1999 г. расхождение в данных по уровню равно менее 15 мм.

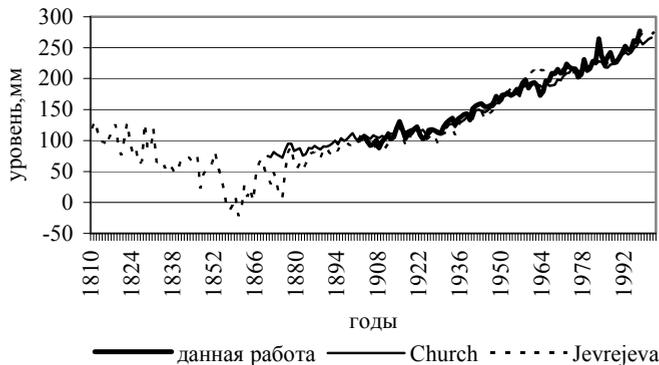


Рис. 3. Реконструкции временного ряда УМО.

Таблица 2

Значения уровня Мирового океана в отдельные годы по данным разных авторов, мм

Источник данных	Г о д ы			
	1861	1870	1958	1999
Данная работа	61,6	80,8	198,4	255,3
Работа [Church, 2006]	–	74,9	188,8	260,0
Работа [Jevrejeva, 2006]	–6,5	40,2	197,9	270,6

Оценим теперь тренды для наиболее характерных промежутков времени, связанных с особенностями выполненной нами реконструкции УМО (табл. 3). Для всех периодов, исключая период с 1870 по 1900 г., тренды очень близки друг к другу. Значительные расхождения в XIX столетии, на наш взгляд, обусловлены слабым освещением Мирового океана данными об уровне, вследствие чего любые методы реконструкции УМО за этот период будут вызывать обоснованные сомнения.

Таблица 3

Оценка параметров линейных трендов УМО для различных промежутков времени по данным разных авторов

Источник данных	1870 – 1900		1901 – 1958		1959 – 1999		1870 – 1999	
	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr
Данная работа	0,03	0,16	0,89	1,62	0,83	1,92	0,92	1,44
Работа [Church, 2006]	0,72	0,95	0,86	1,34	0,93	1,73	0,95	1,39
Работа [Jevrejeva, 2006]	0,68	2,19	0,80	1,65	0,75	1,44	0,94	1,69

Другим источником информации об уровне, как уже указывалось выше, служит метод спутниковой альтиметрии. Его принципиальное отличие от традиционных футшточных наблюдений состоит в том, что он позволяет получить оценки уровня поверхности океана практически на всей акватории океана, 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 уровня поверхности океана. В настоящее время доступны альтиметрические оценки уровня со спутников TOPEX/POSEIDON и JASON, начиная с 1993 г. Эти данные покрывают океан от 66° с.ш. до 66° ю.ш., имеют пространственное разрешение 1/3° в меркаторовской проекции, временное осреднение – десять дней и точностью расчета – 4,2 см. На рис. 4 приводится межгодовой ход УМО по альтиметрическим данным с 1993 г. [Nerem, 2006].

Нетрудно видеть, что главной его особенностью является наличие ярко выраженного тренда, равного $Tr = 3,2 \pm 0,4$ мм/год, который после исключения поправки на гляциоизостатический эффект поверхности океанов, становится равным $Tr = 2,9 \pm 0,4$ мм/год.

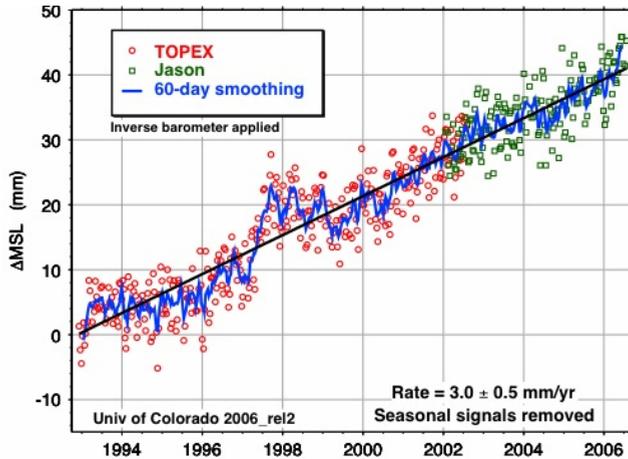


Рис. 4. Межгодовой ход уровня Мирового океана по альтиметрическим данным с 1993 г. по данным работы [Nerem, 2006].

Сравнение трендов за 1993 – 2000 гг. по футшточным и альтиметрическим данным (3,0 и 3,1 мм/год) показывает, что они очень близки, а при совмещении начальных отметок уровня расхождение их в 1999 г. составляет 0,5 см. Это означает, что вполне возможно совмещение футшточных и альтиметрических данных в единый ряд УМО и построение системы его мониторинга на основе дистанционного зондирования со спутников.

Литература

1. Клиге Р.К. Изменения глобального водообмена. – М.: Наука, 1985. – 247 с.
2. Малинин В.Н. О современном состоянии проблемы изменчивости вод гидросферы // Ученые Записки. Вып. 1. – СПб.: изд. РГТМУ, 2005, с. 54–72.
3. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик. – Мурманск: изд. ПИПРО, 2003. – 164 с.
4. Шевчук О.И. О проблеме мониторинга уровня Мирового океана / Сб. тр. межд. школы-конф. молодых ученых, асп. и студентов РГТМУ, 06 – 09 дек. 2005 г. – СПб.: РГТМУ, 2006, с. 39–40.
5. Barnett T.P. The estimation of global sea level change: a problem of uniqueness // J.Geophys. Res. 1984. Vol. 89. С 5, p. 7980–7988.
6. Church J.A. A 20th century acceleration in global sea-level rise // Geophysical research letters. 2006. Vol. 33, p. 563.
7. Douglas B.C. Global sea rise: a redetermination // Survey in Geophysics. 1997. 18, p. 279–292.
8. Fairbridge R.W. Sea level and the southern oscillation // J.Geophys. Res. 1962. Vol. 6, p. 32–545.
9. Gornits V., Lebedeff L., Hansen J. Global sea level trend in the past century // Science. 1982. 215, p. 1611–1614.
10. Jevrejeva S. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111, p.
11. Nerem R.S., Chambers D.P., Leuliette E.W., Mitchum G.T., Cazenave A. Satellite Measurements of Sea Level Change: Where Have We Been and Where Are We Going / 15 Years of progress in Radar Altimetry Symposium. Venice 13-18 March 2006. <http://earth.esa.int/cgi-bin/confalt15y.pl?abstract=1092>.
12. Woodworth P.L., Player R. The Permanent Service for Mean Sea Level: An update to the 21st century // J. Coastal Res. 2003. 19, p. 287–295.