

СРЕДА ОБИТАНИЯ

ПРИРОДНАЯ СРЕДА

УДК:551.465
ББК 26

В.Н. Малинин

ЧТО ПРОИСХОДИТ С УРОВНЕМ МИРОВОГО ОКЕАНА?

Приводятся результаты оценки уровня Мирового океана (УМО) по данным футшточных наблюдений за последние 140 лет (1861–1999 гг.) Показано, что в течение XX столетия величина тренда УМО достигала почти 1,8 мм/год. Обсуждаются оценки вклада разных факторов в изменения УМО за различные промежутки времени XX столетия. В ближайшие десятилетия ожидается повышение темпов роста УМО до 3,5 мм/год.

В последние годы интерес к возможным изменениям уровня Мирового океана резко возрос не только в научных кругах, но и среди населения. Если сбудутся наиболее пессимистические научные прогнозы, то уровень океана к концу нынешнего столетия может повыситься почти на 1 м. Это грозит катастрофическим ущербом для инфраструктуры прибрежных территорий, где проживает около миллиарда жителей. Вполне реально подтопление крупнейших городов Земли: Лондона, Нью-Йорка, Токио, Санкт-Петербурга и других, а также усиление штормовых нагонов и частоты наводнений. Вследствие этого будет происходить ухудшение социально-экономических условий жизни сотен миллионов людей и, возможно, потребуются переселение десятков миллионов человек, прежде всего в таких странах, как Бангладеш, Индия, Индонезия. Например, одной шестой части территории Бангладеш грозит перспектива подвергнуться затоплению или стать непригодной к использованию из-за оползней, а в Индии ожидается, что до 30 млн человек покинут родные места из-за наводнений. Что же происходит с уровнем Мирового океана? Какие факторы оказывают на него максимальное воздействие? Насколько реальной является угроза «глобального» затопления?

Прежде чем ответить на эти вопросы, необходимо показать, как непосредственно измеряется уровень моря. Для этой цели используются две принципиально различные системы наблюдений. Первая – это береговые футшточные (реечные) измерения уровня, имеющие довольно длительную историю. Регулярные футшточные измерения уровня начались в Амстер-

даме в 1765 г., причем эпизодические наблюдения здесь выполнялись еще в начале XVIII века. В настоящее время сеть береговых станций насчитывает более 1700 объектов, которые Межправительственной океанографической комиссией при ЮНЕСКО объединены в единую международную систему GLOSS (Global Sea Level Observing System) – Глобальную Систему Наблюдений за Уровнем моря. Безусловное достоинство береговых наблюдений – это наличие длительных серий наблюдений, а принципиальный недостаток – невозможность измерения уровня вне береговой черты.

Этого недостатка лишен метод спутниковой альтиметрии, который 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 радиарного 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 установить значение высоты уровня океана. Альтиметрические оценки морского уровня стали доступны с 1993 г.

Вследствие вертикальных движений земной коры уровень на отдельно взятой станции может кардинально отличаться от глобального. Например, на восточном побережье Швеции уровень моря в XX столетии опускался, в то время как уровень Мирового океана (УМО), наоборот, рос. Следует также иметь в виду, что до XX столетия уровенных станций было относительно немного, причем подавляющее большинство их размещалось в развитых странах Европы и в США. В южном полушарии станции наблюдений за уровнем практически отсутствовали. Все же, используя всю доступную информацию футшточных наблюдений, на основе статистического моделирования нам удалось осуществить реконструкцию УМО за максимально возможный период времени, составивший почти 140 лет (1861–1999 гг.). Временной ход УМО приведен на рис. 1¹. Естественно, следует иметь в виду, что надежность оценок УМО в XIX столетии значительно уступает точности его оценок в последующие годы.

Как видно из рис. 1, главной закономерностью колебаний УМО является наличие мощного линейного тренда, представленного на графике прямой линией. Средняя скорость роста УМО, т.е. величина тренда (T_r) за весь период времени, составляет 1,4 мм/год, причем тренд описывает более 90% изменчивости исходного ряда. Тем не менее, на общем фоне довольно отчетливо выделяются несколько периодов с различным характером изменений УМО, для которых локальные тренды существенно различны. Это период довольно быстрого роста УМО в 1861–1878 годы ($T_r=2,4$ мм/год), который сменился периодом 1879–1923 гг., когда уровень практически не менялся ($T_r=0,4$ мм/год), а затем, вплоть до 1999 г., уровень опять начал быстро расти ($T_r=2,0$ мм/год). В течение XX-го столетия величина тренда достигала почти 1,8 мм/год. Это хорошо согласуется с данными Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), по которым рост УМО составлял 1,5–2,0 мм/год.

Итак, за 100 лет УМО повысился на 18 см. Но наиболее важно то, что рост УМО имеет тенденцию к ускорению. В частности, за последние 10 лет

его рост по футшточным наблюдениям равен 3,2 мм/год, а по альтиметрическим данным он даже несколько выше – 3,4 мм/год. Если повышение уровня и в дальнейшем будет ускоряться такими же темпами, то это может иметь крайне негативные последствия для населения.

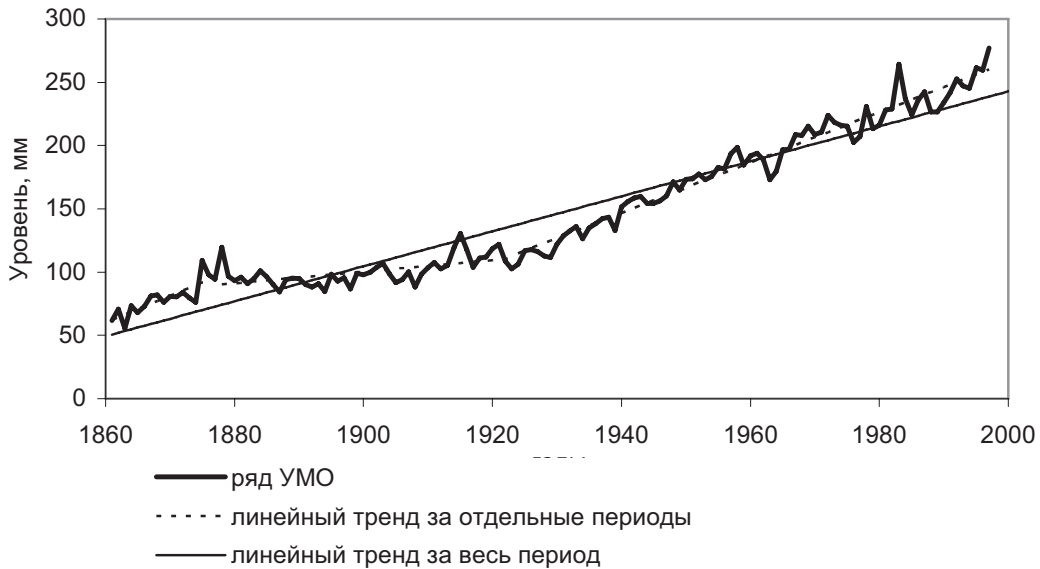


Рис. 1. Межгодовой ход уровня Мирового океана за 1861–1999 гг.

Колебания УМО зависят от действия большого числа разнообразных факторов, причем все они могут быть объединены в три группы: *космо-геофизические силы, геолого-геодинамические процессы, гидрометеорологические процессы*². Временной спектр воздействия внешних сил на уровень чрезвычайно широк: от минут до сотен тысяч и миллионов лет. Нижняя граница – это порывы ветра, а верхняя – астрономические факторы, связанные с положением Земли в Солнечной системе, и эпейрогенические (сверхдлиительные) тектонические процессы, связанные с эволюцией континентов. В рассматриваемом нами диапазоне межгодовых колебаний преобладающий вклад в формирование УМО дают так называемые эвстатические факторы, к которым относятся составляющие водного и ледового баланса (испарение, осадки, приток пресных вод с суши и с ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды, придонное таяние шельфовых ледников), а также стерический фактор, представляющий изменения плотности морской воды в зависимости от ее температуры.

Отсюда следует, что колебания УМО определяются *климатическими* причинами. Все другие факторы, действующие на уровень в рассматриваемом временном диапазоне, являются либо малыми, либо имеют разнонаправленный характер, вследствие чего суммарный эффект их воздействия близок к нулю. Это касается, в частности, современных вертикальных тектонических движений земной коры, которые имеют разный знак в различных регионах Земли и при глобальном осреднении нивелируют друг друга.

Наиболее простой вариант оценки вклада значимых факторов – расчет величины их тренда и последующее сравнение с трендом самого УМО.

Вначале обратимся к оценке эвстатических факторов в том порядке, в каком они были перечислены выше.

До последнего времени ввиду сложности определения количественного уровня испарения и осадков над океанами роль их в колебаниях УМО была неизвестна. Однако нам удалось по данным американского архива CDAS (Climate Data Assimilation System) рассчитать осредненные значения испарения и осадков над Мировым океаном за период с 1980 г. по 2005 г., характеризующийся особенно резким потеплением глобального климата. Как оказалось, в их межгодовом ходе присутствует сильный положительный тренд, обусловленный аналогичным трендом в глобальной температуре воздуха. Для осадков $T_r = 4,2$ мм/год, а для испарения – $3,6$ мм/год. Отсюда следует, что в течение указанного периода УМО повышался на $0,6$ мм/год или на 217 км³/год.

В таблице 1 приводятся оценки вклада трендов испарения и осадков в колебания УМО за 2 периода времени: 1980–1999 и 1990–2000 гг. В ней также даются оценки вклада других уровнеобразующих факторов.

Следующая компонента водного баланса – приток пресных вод с континентов. С учетом усиления хозяйственной деятельности, в которой наибольшее значение имеет безвозвратное водопотребление, имеется слабый отрицательный тренд, составляющий в пересчете на УМО около $-0,1 - -0,2$ мм/год.

Для оценки межгодовых колебаний айсбергового стока с ледникового щита Антарктиды воспользуемся данными Национального Ледового Центра США, осуществляющего спутниковый мониторинг антарктических айсбергов начиная с 1976 г. При этом регистрируются айсберги, присутствие которых отмечается в течение последних 30 суток, а наименьший размер составляет 10 км. Было установлено, что с 1980 г. до 2005 г. число айсбергов увеличилось примерно в 5 раз. При этом их количество возрастало в среднем на 1,7 айсберга в год. К сожалению, очень сложно судить о том, является ли указанный результат следствием только потепления климата или в какой-то мере связан с совершенствованием методов обнаружения и регистрации айсбергов с ИСЗ. Но несомненно, что первая причина является главенствующей.

Данные о числе айсбергов были приближенно пересчитаны в объем льда и далее – в объем содержащейся в них воды. В результате было получено значение линейного тренда межгодовых колебаний объема воды в ледниковом стоке $T_r = 77,5$ км³/год, что в пересчете на уровень океана составляет $0,22$ мм/год. Однако в конце столетия отмечается существенное увеличение ледникового стока, вследствие чего тренд увеличивается почти в 2 раза. В таблице 1 даются соответствующие оценки вклада айсбергового стока в колебания УМО.

Оценки суммарного (твердого и жидкого) стока Гренландии, представленные в таблице, приведены по данным различных зарубежных источников. Что касается определения тренда в таянии шельфовых ледников Антарктиды, то это наиболее сложная задача. Его можно приблизительно оценить лишь экспертным путем. Воспользуемся для этого оценками Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК или Intergovernmental Panel on Climate Change)³, проанализировавших огромное число зарубежных публикаций, но, к сожалению, без учета ре-

зультатов отечественных исследований. По их данным, во вторую половину XX столетия таяние шельфовых ледников составляло в среднем 540 км³/год, причем до середины 70-х гг. можно было считать, что донные таяние и намерзание практически нивелировали друг друга. Поэтому прием в первом приближении тренд в донном таянии с 1980 г. равным 0,2–0,8 мм/год.

Таблица 1

Оценки вклада разных факторов в изменения УМО за различные промежутки времени XX столетия

Период времени		1980–1999	1990–2000
Изменения уровня Мирового океана, мм/год	Изменения УМО по данным наблюдений	1,9	2,3
	Вертикальный влагообмен (Р-Е)	0,5	0,2
	Стерические колебания	0,2	0,6
	Твердый сток Антарктиды	0,2	0,3
	Донное таяние шельфовых ледников	0,3	0,4
	Суммарный сток Гренландии	0,1	0,2
	Невязка (дисбаланс)	0,6	0,6

Колебания УМО в большой степени зависят от стерического фактора (см. выше). Как известно, при повышении температуры плотность уменьшается, а уровень океана увеличивается. Самое сложное при этом – оценка изменений температуры глубинных слоев океана. Следует иметь в виду, что передача тепла от поверхности океана к его дну происходит очень медленно, многие годы, возможно, десятилетия. Если предположить, что потепление климата мгновенно сменилось похолоданием, то все равно глубинные слои океана будут продолжать прогреваться. Выполненные американскими исследователями расчеты изменений плотности в слое от 0 до 700 м за период 1955–2003 годы показали, что их вклад в колебания УМО составлял 0,4 мм/год, причем за последнее десятилетие он возрос до 1,2 мм/год, т.е. в 3 раза. Оценки вклада стерической компоненты в колебания УМО также представлены в таблице 1.

Нетрудно оценить невязки за оба рассматриваемых периода. Они определяются как разность оценок тренда УМО, полученных по фактическим данным и вычисленных по уравнению водного баланса Мирового океана. Как видно из таблицы, в обоих случаях невязка равна 0,6 мм/год, что существенно меньше роста УМО по данным наблюдений. Безусловно, оценки трендов следует считать в значительной степени условными вследствие короткой длины временных рядов, поскольку даже изменение длины ряда на 1 год может привести к существенному изменению величины тренда. Тем не менее, они дают наглядное представление о сравнительной роли отдельных факторов в росте УМО, а согласованный характер величин невязок в таблице повышает степень доверия к оценкам трендов. Одновременно с этим нужно признать, что уровень наших знаний о физических процессах, формирующих изменения уровня океана, весьма далек от идеального и существенно неравнозначен.

На наш взгляд, оценки трендов факторов, обуславливающих изменения УМО, целесообразно разделить на 3 категории. Относительно точные оценки трендов могут быть получены для суммарного притока пресных вод с материков и 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 вызывающими наименьшую степень доверия являются тренды в стерических колебаниях уровня, особенно в донном таянии шельфовых ледников. Если учесть, что именно эти факторы во многом имеют определяющее значение в росте УМО в современных условиях потепления климата, то довольно большие значения невязок в таблице становятся вполне понятными и объяснимыми.

Ответить на последний вопрос, поставленный в начале этой статьи с одной стороны очень просто, а с другой – весьма сложно. Несомненно, что УМО в ближайшие десятилетия продолжит свой рост. Сложно ответить на то, каковы будут темпы его роста. Здесь мнения разных ученых расходятся кардинально. Нами разработана физико-статистическая модель колебаний УМО, предикторами для которой служат значения приповерхностной температуры воздуха над океаном. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что изменения глобальной температуры воздуха будут сказываться на колебаниях УМО через 20 и даже 30 лет. Если учесть, что последние два десятилетия прошлого столетия были самыми теплыми, то возможно некоторое ускорение темпов роста УМО до 3,5 мм/год. Однако всемирного «потопа» в обозримом будущем не ожидается.

¹ Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И. Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет// Ученые Записки. Вып.4. – СПб.: РГМУ. – 2007. – С. 125–132.

² Догановский А.М., Малинин В.Н. Гидросфера Земли. – СПб.: Гидрометеиздат. – 2004. – 639 с.

³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) WGI Third Assessment Report. – Chapter 11. – Changes in Sea Level. – Editors Douglas B.C., Ramirez A. – 2000. – 76 p.