

В. В. Орленок

РОЛЬ ЭНДОГЕННОГО ФАКТОРА В ИЗМЕНЕНИИ УРОВНЯ ОКЕАНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 140 ЛЕТ

8

Исследуется структура и динамика уровня Мирового океана за последние 140 лет. Выявлена доминирующая роль эндогенного фактора в постоянном увеличении объема водных поступлений и подъеме уровня океана. Выделены два основных цикла изменения уровня — высокоамплитудный короткий (2–3 года) и малоамплитудный, продолжительный (40–50 лет). Обнаруживается совпадение по времени двух событий — коротких циклов и сильных землетрясений в океанических областях. Показана возможность оценки размеров площади и амплитуды опускания дна в районе эпицентра, адекватных изменяющемуся объему воды. Короткие циклы изменения уровня обычно совпадают с изменением приземной температуры на средних широтах, что может оказаться предвестником климатических аномалий в северном полушарии.

The article examines the structure and dynamics of the World Ocean level during the past 140 years. The role of endogenous factor in constant increase of water supply and subsequent rise of the sea level is defined as dominating. Two principle cycles in the sea level fluctuations were distinguished: a high-amplitude short-term cycle (2–3 years) and a low-amplitude long-term one (40–50 years). The concurrency of two events is traced: short-term cycles and major earthquakes in oceanic regions. It was shown that it is possible to estimate the area and amplitude of the seafloor submergence in the epicenter in relation to changes in water volume. Short-term cycles of sea level fluctuations usually coincide with changes in surface layer temperatures in middle latitudes, which could be regarded as a precursor of anomalous climatic conditions in the Northern hemisphere.

Ключевые слова: цикличность изменения уровня океана, эндогенные и экзогенные факторы.

Более 300 лет ведутся наблюдения за изменением уровня Мирового океана, начиная с футштоков в Амстердаме (1682) и Крондштадте (1804). В последние годы эти наблюдения ведутся непрерывно на более 2000 водомерных постах, расположенных на берегах морей и океанов. Одновременно с этим проводятся непрерывные измерения приземной температуры на континентальной суше. С середины 50-х гг. XX столетия ведутся исследования динамики ледяного покрова Антарктиды, а несколько позднее стал осуществляться спутниковый мониторинг шельфовых



ледников. Американские исследователи, подводя итоги этих 25-летних наблюдений, в начале 1980-х гг. оценили объем ежегодно откалывающихся айсбергов от шельфовых ледников Антарктиды в $250 \text{ км}^3/\text{год}$, что соответствует $0,69 \text{ мм}/\text{год}$ по уровню [1; 6]. На первый взгляд, приведенные цифры можно было бы принять в качестве вклада ледового стока в океан, однако большая часть краевых шельфовых ледников Антарктиды находится на плаву. Поэтому они уже включены в объем вод океана и не могут влиять на его изменение. В связи с этим представляет интерес изучить современный вклад Антарктиды в ежегодный ледово-айсберговый сток в океан. По данным В.М. Котлякова [6], баланс антарктического ледникового покрова составляет: $2230 \pm 280 \text{ км}^3$ – приход, $2335 \pm 490 \text{ км}^3$ – расход; т.е. отмечается небольшой отрицательный баланс, около 100 км^3 . Наблюдаемый откол айсбергов составляет 1940 км^3 [6]. Р.К. Клите приводит несколько иную оценку объема поступления айсбергов – от 300 до $1000 \text{ км}^3/\text{год}$ [5]. Вокруг Антарктиды постоянно плавают до 15 000 км^3 многолетних и свежих айсбергов [6].

В арктическом секторе океана основная масса льда также находится на плаву. Поставщиком материкового льда является преимущественно Гренландия. Объем попадающих в океан материковых айсбергов, по видимому, невелик и не превышает нескольких десятков кубических километров [1; 7]. Таким образом, точное количество впервые попавшего в океан льда остается неясным.

Как было установлено автором [7; 8], постоянный вклад в изменение уровня океана вносят эндогенные поступления воды в объеме $289 \text{ км}^3/\text{год}$, или $0,8 \text{ мм}/\text{год}$ – по уровню (рис. 1), образующейся в результате дегидратации низов земной коры, суммарное проседание которой в астеносферу за последние 70 млн лет составило 8 км. Кроме того, в структуру уровня должны быть включены: твердый сток рек в океан – 7 км^3 , или $0,02 \text{ мм}/\text{год}$; подводный вулканизм – 3 км^3 , или $0,01 \text{ мм}/\text{год}$; потери на фотолиз – 9 км^3 , или $0,03 \text{ мм}/\text{год}$ по уровню. В итоге на долю ледового стока приходится $0,7 \text{ мм}$ по уровню, или 253 км^3 по объему. В результате средняя скорость подъема уровня океана на начало 80-х гг. прошлого столетия составила: $(0,8+0,7+0,01+0,02-0,03) \text{ мм} = 1,5 \text{ мм}/\text{год}$, или 542 км^3 по объему.

В структуре изменения уровня океана эндогенная составляющая должна присутствовать всегда, так как процесс опускания дна океана и поступления эндогенной воды установился много миллионов лет назад (рис. 1) и его внезапные изменения в ту или иную сторону невозможны [7; 8]. Полученное значение ледового стока ($0,7 \text{ мм}/\text{год}$) совпадает с данными Института водных проблем СССР, определенными на начало 1980-х гг. [4]. До последнего времени автор предполагал, что эндогенная составляющая в балансе воды будет постоянной величиной. Однако, если бы это было так, то возникла бы заманчивая возможность количественной оценки ежегодного объема ледово-айсбергового стока, потому что, как это следует из уравнения водного баланса, данный параметр в нем стал бы единственной переменной:

$$P - E + R + T + A = L \text{ при } P - E + R \approx 0, \text{ тогда } T + A = L,$$

где P – осадки, E – испарение, R – речной и подземный сток в океан, T – внутриземные поступления воды, A – ледово-айсберговый сток [7].

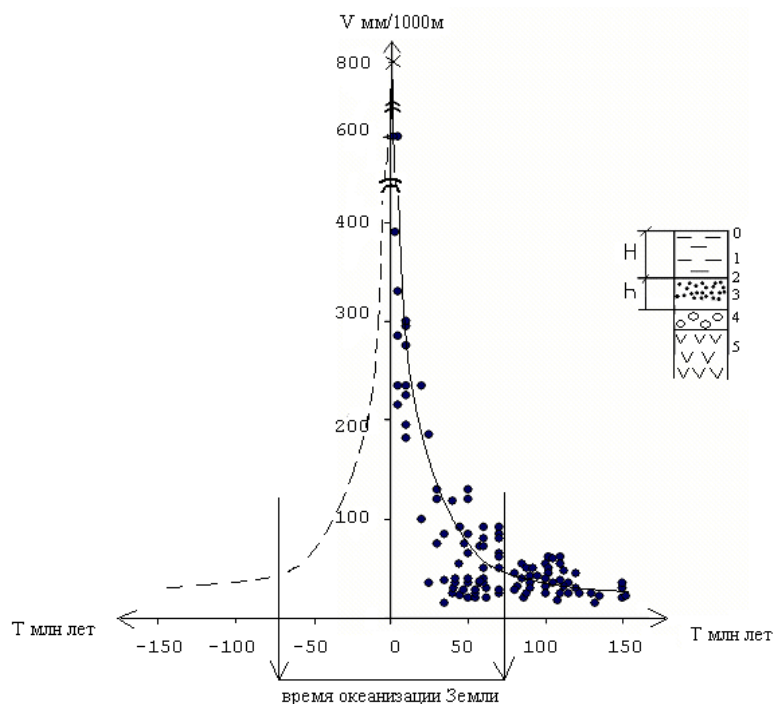


Рис. 1. Скорость опускания дна Мирового океана и поступление эндогенной воды (в мм/тыс. лет) за последние 150 млн лет, рассчитанные по данным бурения «Гломар Челленджер», полученным в 1985 г. [7; 8]:

1 – вода; 2 – дно; 3 – глубоководные осадки;
4 – древние мелководные осадки; 5 – платобазальты

За последние 100 лет средний уровень океана поднимался со скоростью 2,8 мм/год. В этом случае, если весь подъем уровня относить за счет таяния полярных ледников, объем безвозвратных потерь составит более 1000 км³. Однако столь сильная деградация ледников в Антарктиде не наблюдается; ежегодный объем ледового стока едва превышает 50–100 км³, так как основной вклад дают шельфовые ледники, которые уже находятся на плаву и на изменение уровня океана не влияют. Таким образом, масштаб вклада полярных ледников сильно преувеличен и подъем уровня происходит за счет эндогенных поступлений воды, которые исследователями не учитываются. Эндогенная составляющая (T) также подвержена значительным изменениям.

Рассмотрим результаты наблюдения за изменением уровня Мирового океана за последние 140 лет (рис. 2) [5]. Прежде всего, отмечается общая тенденция возрастания уровня начиная с 1870 г., суммарная величина которого к 2008 г. составила более 200 мм, а его средняя скорость – 1,43 мм/год. Однако за этой средней цифрой скрывается по меньшей мере три продолжительных периода, когда скорость существенно (в 2–4 раза) отличалась от среднего значения. Так, с 1870 по 1920 г. средняя скорость подъема уровня на протяжении 50 лет составляла всего 0,8 мм/год и фактически совпадала со значением эндогенных поступлений воды, т.е. ледово-айсбергового стока практически не было из-за общего похолодания климата.

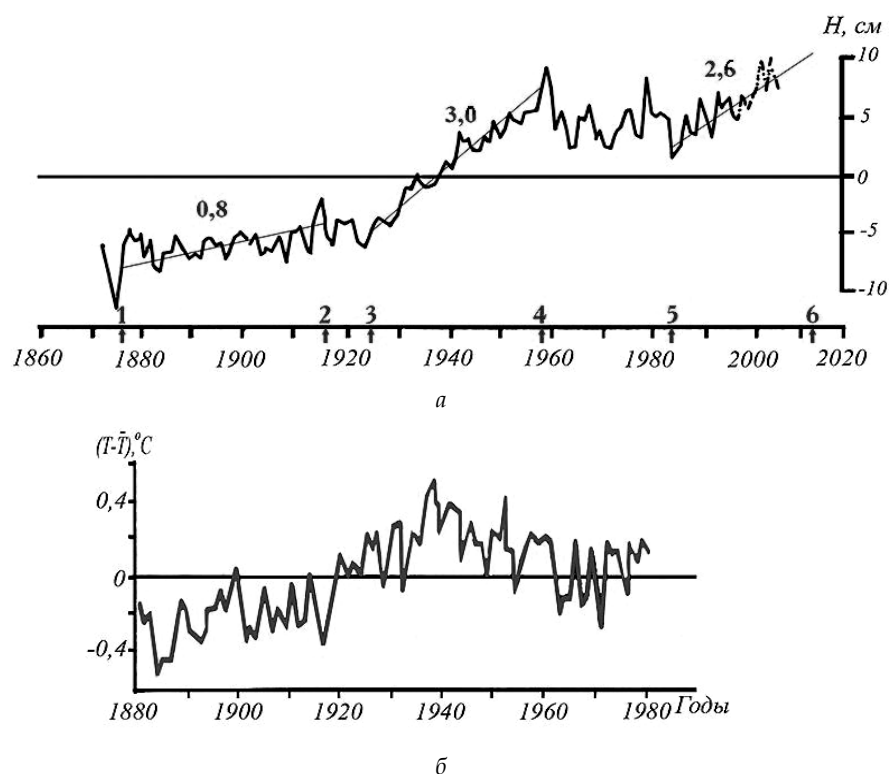


Рис. 2. Изменение обобщенного уровня Мирового океана за последние 140 лет [4] и приземной температуры на средних широтах за 100 лет

С 1920 по 1960 г. подъем уровня увеличился до 3,0 мм/год, и эта скорость не менялась в течение 40 лет.

С 1959 по 1972 г. наблюдалось, наоборот, значительное падение уровня со скоростью -3,6 мм/год. Однако с 1980 г. по настоящее время (2008) уровень океана стал опять подниматься со средней скоростью 2,6 мм/год (рис. 2).

Сравнение изменения уровня Мирового океана с наблюдениями за изменением приземной температуры на континентальной суше в средних широтах [3] обнаруживает общую тенденцию возрастания температуры по мере подъема уровня океана, которая в целом за первые 70 лет (1870–1940) составила 0,8° С. Однако, несмотря на продолжающийся до 1960 г. подъем уровня, в последующие 40 лет, с 1940 по 1980 г., приземная температура непрерывно падала, и в среднем суммарное падение составило 0,25° С. Эта картина подтверждается наблюдениями за среднезимней и среднелетней температурой воздуха в арктических широтах (60 N – 80 N) (рис. 2) [2]. Здесь после максимума в начале 1940-х гг. среднее значение температуры падало до 1980 г., после чего вновь начался устойчивый подъем, составивший к 2000 г. 1,5–2° С. В это же время, особенно в промежутке между 1960 и 1982 гг., поведение уровня было хаотическим. Наблюдалось как стремительное его падение на значительную амплитуду, так и стремительное возрастание.



В целом можно выделить три продолжительных цикла подъема уровня океана длительностью 40–50 лет. Последний цикл, начавшийся в 1980 г. (вероятно, еще незавершенный), длится уже 28 лет, а скорость уровня возросла до 2,6 мм/год. Выделенные циклы разделены короткими эпизодами (в 2–3 года) стремительного возрастания и последующего резкого падения уровня с большими амплитудами (40–70 мм). Примечательно, что после каждого такого катастрофического падения уровня наступает достаточно длительный период (цикл) его медленного возрастания. В таблице 1 приведены данные расчетов среднегодовых объемов воды, поступавшей в океан в течение каждого из этих продолжительных циклов, и общий ее объем за весь цикл.

12

Таблица 1

Изменение уровня океана и объемов воды в последние 140 лет

N	Годы наблюдений	Изменение уровня (мм/год)	Объем поступившей воды (км ³ /год)	Общий объем за период (км ³)
1	1870–1920	0,8	288	14400
2	1920–1960	3,0	1083	43320
3	1981–2008	2,6	938	25326
<i>Итого:</i>	За 140 лет	Суммарное повышение уровня за 120 лет ~230 мм	Ср. в год 770 км ³	Суммарный объем воды, поступившей при повышении уровня, – 85000 км ³

Одновременно были выполнены расчеты сокращения объема воды в моменты быстрого падения уровня, которые сопоставлены с событиями сильных землетрясений (табл. 2).

Таблица 2

Кратковременное падение уровня океана, изменение объемов воды и опускание дна

Годы наблюдений	Амплитуда падения уровня (мм)	Измененный объем воды (км ³)	Вероятная площадь опустившегося дна океана (км ²)	Амплитуда опускания дна (м)	События: землетрясения, вулканизм
1870–1883	65	23465	~ 3·10 ⁶ или ~ 3·10 ⁵	~ 10 или ~100	Взрыв вулк. Кракатау, гигантское цунами (M≈9)
1918–1920	51	18411	1,8·10 ⁵	~100	Землетрясение M>8,6
1959–1962	70	25270	3·10 ⁶ или 3·10 ⁵	~ 10 или ~100	Чилийское землетрясение (M≈ 9)
1979–1981	75	27075	3·10 ⁶ или 3·10 ⁵	~ 10 или ~100	Землетрясение M>8,6



Годы наблюдений	Амплитуда падения уровня (мм)	Измененный объем воды (км ³)	Вероятная площадь опустившегося дна океана (км ²)	Амплитуда опускания дна (м)	События: землетрясения, вулканизм
2005	?	?	~ 3·10 ⁶	~ 10	Землетрясение в Зондской островной дуге (M>8,0)
Итого:	Суммарное падение уровня ~ 260 мм	Суммарное сокращение объема воды 94221 км ³ - ~ 95000 км ³	—	—	—

Приведенные данные показывают, что сокращение объема воды во время коротких циклов нередко оказывается сопоставимым с объемом воды, поступившей за 40–50 лет предыдущего продолжительного цикла.

Из данных 140 лет проведенных наблюдений видно, что 120 лет уровень Мирового океана поднимался и около 20 лет ушло на кратковременные циклы его падения. При этом общий подъем за 120 лет составил 230 мм; за это же время в океан поступило около 85 000 км³ воды. За 20 лет падения уровня его суммарная амплитуда составила 260 мм, а объем уменьшения воды (вследствие увеличения емкости впадин) ≈ 95 000 км³. Таким образом, наблюдается удивительное совпадение баланса поступления и поглощения (за счет падения уровня) объемов воды. С другой стороны, если бы не было этого поглощения, то за последние 140 лет суммарный подъем уровня составил бы не 230 мм, а в 2 раза больше — 490 мм, или около 0,5 м.

В связи с этим возникает вопрос: в чем причина таких колебаний в изменении уровня океана?

Большинство исследователей, не вдаваясь ни в какие детали, объясняют повышение уровня океана общим потеплением климата. Однако, как мы видели, это повышение не всегда сопровождалось потеплением, наоборот: на фоне повышения уровня с 1940 г. началось длительное падение среднегодовой температуры на средних широтах Северного полушария и заметное похолодание [3].

Отметим еще одну закономерность: быстрому, и даже катастрофическому, падению уровня океана чаще всего предшествует столь же быстрый и высокоамплитудный подъем его уровня (рис. 2). Проведенный выше анализ бюджета динамики антарктического ледникового покрова — как одного из главных поставщиков льда в океан — показывает, что даже если бы весь годовой ледово-айсберговый сток в объеме 2300 км³ обрушить в океан, то он поднял бы уровень всего на 6,7 мм. Поэтому айсберги не являются причиной кратковременных циклов падения или подъемов уровня. Что же касается климата, то он чаще всего следует за изменением уровня океана, а не предшествует ему. Однако, несмотря на большую инерционность климатической машины Земли, отмечается стремительное падение приземной температуры одновременно с резким падением уровня океана. Быстрое похолодание может быть



следствием крупных вулканических извержений, увеличивающих непрозрачность стратосферы и тем самым уменьшающих солнечную радиацию (табл. 3) [3]. Однако вулканическое извержение, если оно не сопровождается мощным землетрясением в области океана, не оказывает влияния на резкое изменение его уровня. Таким образом, остается единственная причина резких падений уровня океана, имевших место на рубеже двух веков. Это тектонический фактор. Быстрое увеличение емкости океана может произойти только в одном случае — при стремительном опускании блоков земной коры и океанического дна, что происходит обычно во время сильных землетрясений (табл. 2).

Вулканическая активность за последние 100 лет [3]

Показатель	1883— 1892	1893— 1902	1903— 1912	1913— 1922	1929— 1932	1933— 1942	1943— 1952	1953— 1962	1963— 1972	1973— 1982
Число извержений	5	3	4	2	5	1	3	2	7	8
Сумма выбросов в стратосферу, Мт	53,7	13,8	17,4	5,4	10,4	2,4	6,3	6,1	26,0	15,3
Сумма отклонений от нормы прозрачности атмосферы после извержений, %	27,4	11,7	17,7	2,6	7,8	0,0	5,5	1,7	6,0	8,2

Важно отметить, что многим сильным землетрясениям (с магнитудой порядка 8,6—9) предшествует подъем крупных блоков земной коры. Такой подъем может вытеснить значительный объем океанской воды (до 12 000 — 15 000 км³), не сравнимый ни с какими айсбергами, но по достижении лимита прочности горных пород происходит разрыв их сплошности и резкий сброс поднимающихся и соседних блоков земной коры. При этом обнаруживается интересная закономерность — после каждого катастрофического падения уровня начинается новый цикл длительного его подъема. Обычно этот цикл длится 40—50 лет. Так было после быстрого падения в 1878—1883, 1920—1922, 1958—1960 гг. и в 1981 г. (см. рис. 2). Современный значительный подъем уровня начался после особенно сильного и быстрого его падения на 65 мм в 1980—1985 гг. Тектоническая причина таких стремительных изменений емкости гигантской впадины Мирового океана — очевидна. Становится понятным, что после землетрясения и быстрого опускания одного из участков дна океана возрастает интенсивность дегидратации низов коры, что вызывает увеличение массы выносимой в океан эндогенной воды, сопровождающееся подъемом уровня океана.

Из приведенного следует очень важный вывод: глобальное изменение уровня Мирового океана происходит не вследствие потепления климата, а в результате продолжающегося проседания различных уча-



стков дна океана и возрастания объемов воды, выносимой в океан из-за усиления процессов дегидратации низов коры. Наблюдаемое потепление климата в рассматриваемом историческом периоде времени вызвано именно этим процессом. Многие исследователи, изучающие изменение уровня океана, к сожалению, не учитывают эндогенный фактор, как и фотолитические потери воды. Но эти факторы реально существуют в структуре изменения уровня, так как Земля является открытой термодинамической системой — вода поступает из недр по глубинным разломам, а часть ее в объеме 9 км^3 теряется при фотолитизе и диссипирует в космическое пространство.

Продолжающаяся океанизация Земли — главный регулятор этого процесса. Что же касается увеличения содержания атмосферного CO_2 и возможного парникового эффекта, то его можно рассматривать в качестве одного из второстепенных факторов потепления климата, поскольку извержение одного среднего вулкана приводит к выбросу такой массы CO_2 , которая может быть соизмерима с многолетним антропогенным ее поступлением [3]. Парниковый эффект CO_2 более чем в 4 раза меньше парникового эффекта, создаваемого парами воды. Поэтому возрастание объема испарений будет продолжаться вследствие повышения увлажненности поверхности Земли, а не из-за роста атмосферного CO_2 , который при его возрастании будет интенсивнее ассимилироваться карбонатной системой Мирового океана.

Нельзя также забывать и не учитывать значительный вклад урбанизации территорий, иссушение и засоление земель, с которых исчезает растительность, участвующая в фотосинтезе и утилизации атмосферного CO_2 . Поэтому повсеместное восстановление зеленых насаждений является одним из необходимых путей уменьшения CO_2 .

Возникает вопрос: каковы ближайшие перспективы изменения уровня океана и связанные с ним климатические изменения?

Исследованный здесь ряд наблюдений слишком короток, чтобы получить достаточно обоснованный прогноз на будущее. Тем не менее общая тенденция направленности изменения всей исследуемой системы вполне определилась. Уровень Мирового океана в целом поднимается, что вызывает изменение соотношения площади суши и моря, а вместе с ним повышение увлажненности и потепление климата. Этот процесс начался не вчера, а почти 70 млн лет назад вместе с образованием Мирового океана современных размеров и глубины. Проседание дна океана продолжается, увеличивая емкость океанических впадин, но одновременно с этим активизируются процессы дегидратации коры и возрастает вынос на поверхность все больших объемов эндогенной воды. Можно говорить о цикличности изменения скорости подъема уровня. Продолжительность циклов в 40–50 лет, по-видимому, отражает предел прочности океанической коры и тем самым определяет периоды крупных ее подвижек, сопровождающихся мощными землетрясениями.

Настоящий цикл, начавшийся в 1980 г., длится еще только 28 лет, следовательно, до его завершения пройдет еще по меньшей мере 12 лет. Начиная с 2020 г. следует ожидать возникновения новых крупных землетрясений в океаническом секторе, в основном по периферии Тихого океана, в зонах Антильской, Южно-Сандвичевой и Зондской островных



дуг Атлантического и Индийского океанов. Одним из признаков предстоящих сильных землетрясений является первоначально резкий подъем уровня океана, а затем быстрое его падение. Обычно оно сопровождается глобальным понижением температуры в Северном полушарии – на величину порядка $0,2^{\circ}$ С. Например, после последнего сильнейшего землетрясения в районе Зондской островной дуги зимой 2005 г. и резкого падения океанского уровня на следующий год в Северном полушарии наблюдалась долгая и чрезвычайно морозная зима с необычайно низкими температурами ($-35... -40^{\circ}$ С).

В динамике уровня океана (моря) вместе с изменением приземной температуры обнаруживается прогностический потенциал по предупреждению сильных землетрясений, а также грядущих значительных, хотя и кратковременных, климатических изменений, особенно на средних широтах в Северном полушарии. Появляется возможность по амплитуде быстрого изменения уровня рассчитать изменения объема поступления или сокращения воды и дать оценку адекватной ему амплитуды и площади опусканий дна морей или океана в районе эпицентра.

В связи с этим представляется актуальной необходимость создания сети водомерных постов (футштоков) на берегах бесприливных морей (например, Балтийского, Черного, Каспийского, оз. Байкал), а также на тихоокеанском побережье с целью оперативного мониторинга региональной сейсмичности.

Сильное землетрясение в западной части Восточно-Европейской платформы с магнитудой 5,4 по шкале Рихтера [9], случившееся в сентябре 2004 г., заставило пересмотреть укоренившиеся представления о слабой сейсмичности платформенных структур и искать пути перехода от пассивной регистрации событий в этих областях к предупреждению сейсмической опасности. Одним из таких инструментов может быть характер изменения уровня моря (в данном случае Балтийского), для чего необходимо сооружение водомерного поста (футштока) на побережье Калининградской области.

Заключение

Ввиду больших различий в размерах океанических бассейнов, инерционности их водных масс возникает вопрос: насколько реально отражает картину анализируемый обобщенный график изменения уровня Мирового океана? Согласно наблюдениям, скорость изменения уровня в каждом из океанов меняется неодинаково [4; 5]. Однако общая тенденция его повышения сохраняется везде. Имеется также корреляция уровня с повышением приземной температуры и, самое главное, отклик ее на резкие короткопериодные колебания уровня. Но эти циклы не везде хорошо выражены. Вероятно, более определенная картина событий будет отражаться по каждому океану (морю) в отдельности. При этом следует иметь в виду различную сезонность наблюдений по футштокам Северного и Южного полушарий.

Тем не менее, несмотря на высказанные соображения, представленные здесь методика, анализ и интерпретации комплекса параметров, оказывающих то или иное влияние на изменение океанского (морского) уровня, позволяют лучше понять картину происходящего и роль каждого фактора в этом сложном процессе.



Список литературы

1. *Shepherd A., Wingham D.* Recent Sea-Level Contributions of the Antarctic and Greenland Ice Sheets // *Science*. 2007. V. 315. P. 1529 – 1532.
2. *Голубев В.Н., Сократов С.А., Шишиков А.В.* Влияние арктического ледяного покрова на содержание CO₂ в атмосфере северного полушария // *Горизонты географии. К 100-летию К.К. Маркова*. М.: Изд-во МГУ, 2005.
3. *Дроздов О.А., Лугина К.М, Малкова И.В.* [и др.]. Статистическая структура современных изменений температуры по регионам Северного полушария и ее связь с колебаниями прозрачности атмосферы // *География и современность*. Вып. 8: сб. статей / под ред. С.Б. Лаврова, Ю.П. Селиверстова. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999.
4. *Клиге Р.К.* Изменение глобального водообмена. М.: Наука, 1985.
5. *Клиге Р.К., Данилов И.Д., Кошицев В.Н.* История гидросферы. М.: Научный мир, 1998.
6. *Котляков В.М.* Избранные сочинения: в 6 кн. Кн. 1: Гляциология Антарктиды. М.: Наука, 2000.
7. *Орленок В.В.* Физика и динамика внешних геосфер. М.: Недра, 1985.
8. *Орленок В.В.* К расчету баланса эндогенных поступлений и фотолитических потерь земной гидросферы // *ДАН СССР*. 1987. Т. 296. №5. С. 1191 – 1196.
9. *Орленок В.В.* Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 г. // *Изв. РГО*. Т. 138. Вып. 2. С. 66 – 71.
10. *Rahmstorf S., Gazeau A., Church J.A.* [et al.]. Recent Climate Observations Compared to Projections // *Science*. 2007. V. 316. P. 709.

Об авторе

В.В. Орленок – д-р геол.-минерал. наук, проф., РГУ им. И. Канта.