

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

**Возрастание среднего глобального уровня океана и средних уровней океана в северном и южном полушариях Земли в современную эпоху**

Ю. В. Баркин

*Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга МГУ.**Россия, 119991, Москва, Университетский просп., д. 13.**E-mail: barkin@inbox.ru*

Статья поступила 16.09.2010, подписана в печать 26.04.2011

Исследуются механизмы возрастания среднего глобального уровня океана в современную эпоху. Дано объяснение явлению контрастного векового изменения средних уровней океана в северном и южном полушариях, предсказанному ранее автором на основе наблюдаемого векового тренда центра масс Земли в северном направлении со скоростью 5–6 мм/год. Дана критическая оценка исследований изменения уровня океана альтиметрическим методом.

*Ключевые слова:* глобальный уровень океана, вариации уровня океана, северное и южное полушария, вековой океанический прилив.

УДК: 551.35. PACS: 92.70.Jw.

**Введение**

Современное состояние проблемы возрастания среднего уровня океана характеризуется противостоянием двух направлений его исследований: береговым методом измерений уровня океана на приливных станциях и спутниковым методом — методом альтиметрии. Оценки скорости нарастания глобального уровня океана, полученные методом альтиметрии по данным спутниковых наблюдений за последние 15 лет, примерно в два раза превышают аналогичные оценки, полученные береговым методом за тот же период времени [1–5].

На Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле в Вене в 2008 г. состоялся симпозиум, посвященный 75-летию образования международной службы наблюдений за глобальным уровнем океана. Несмотря на энтузиазм участников этого симпозиума, было четко заметно два подхода к проблеме. Одни ученые легко докладывали, опираясь на ряд многолетних наблюдений за уровнем океана в различных регионах его побережья, что скорость повышения уровня океана для многих береговых и островных станций (например, в южном полушарии) в последние десятилетия составляет около 1–1.5 мм/год, а зачастую и меньше [6]. Наблюдаются иногда и высокие значения скорости изменения уровня океана, как правило, в тектонически активных местах и обусловлены они, по-видимому, в первую очередь процессами опускания и подъема берегов в локальном масштабе. Подобные значения скоростей при изучении глобального поведения океана должны исключаться из рассмотрения (при осреднении).

Но еще более энергично и уверенно другая группа ученых, опирающихся на космические методы исследования — методы альтиметрии, легко показывала, что скорость возрастания глобального уровня океана имеет существенно большие значения в 3–4 мм/год [1–5]. При этом представители обоих научных направлений прекрасно уживаются друг с другом, как

бы не замечая феноменального противоречия в своих результатах. В моих работах 2007–2009 гг. по изучению векового изменения уровня океана, опубликованных в трудах конференций [7, 8], было показано, что это различие является принципиальным и связано с ошибочной интерпретацией спутниковых альтиметрических измерений. При обработке альтиметрических измерений игнорировалось фундаментальное геодинамическое явление — дрейф центра масс Земли в северном направлении и связанное с ним явление относительного полярного смещения центров масс ядра и мантии [9–11]. Указанный дрейф является динамическим следствием вынужденных относительных колебаний и смещений оболочек Земли (в первую очередь ядра и мантии) под действием гравитационного притяжения внешних небесных тел и в результате взаимодействий друг с другом [12, 13]. Геодинамическая модель возбуждения несферичных и эксцентричных оболочек планеты внешними небесными телами, разработанная в [12, 13], составляет основу исследования планетарного поведения и изменений уровня океана в современную эпоху, представленного в настоящей работе. Поэтому для нас важно отметить, что эта геодинамическая модель уже получила важные приложения в геодинамике, планетодинамике, тектонике, геологии и геофизике, а результаты модельных (теоретических) исследований получили подтверждения в современных данных наблюдений.

Геодинамическая модель вызвала повышенный интерес у многих специалистов по наукам о Земле, включая геологов. Эта модель фигурирует в основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли, разработанной акад. В. Е. Хаиным [14]. Именно вынужденные колебания оболочек Земли (ядра и мантии) [13] рассматриваются в качестве механизма дополнительного циклического выделения тепла на границе ядро–мантия [15]. Полярные смещения и колебания ядра относительно мантии в геологической шкале времени приводят к инверсионным цикличе-

ским изменениям геодинамических обстановок северного и южного полушария, которые были обнаружены в результате многолетних исследований геологических данных проф. Н. А. Божко [16]. Относительные смещения и повороты ядра и мантии Земли являются вынужденными и в геологической шкале времени определяют цикличность сборки и распада суперконтинентов, фундаментальные тенденции их перестройки и перегонки между северным и южным полушариями [13, 16, 17]. Два небесно-механических фактора определяют характер возбуждения системы ядро–мантия внешними телами: эллипсоидальность мантии и неинерциальные свойства движения системы ядро–мантия, вызванные эксцентричным положением ядра [12, 13]. Эти факторы являются постоянно действующими и проявляют себя в разных шкалах времени, включая наиболее длительные — геологические. В работах [14, 18, 19] получила дальнейшую разработку геотектоника полушарий Земли, заложенная в работах автора [12, 13], теория мантийной конвекции и конвекции ядра. С позиций геодинамической модели возбуждения системы оболочек Земли изучена природа (происхождение) геологических формирований с субмеридиональной ориентацией как на континентах, так и на дне океана [20]. Относительные смещения ядра и мантии (колебания в различных шкалах времени), их взаимные деформации и изменения неизбежно приводят к вариациям течений в жидком ядре и на его границе с мантией. Все эти изменения получают отражение в вариациях всех физических полей Земли, включая магнитное поле. Этот механизм направляет и определяет вариации магнитного поля Земли с набором частот характерным для возмущений орбитальных движений тел Солнечной системы, в частности с периодами так называемых вековых планетных возмущений в десятки и сотни тысяч лет (циклы Миланковича) [13]. Таким образом, согласно геодинамической модели вариации магнитного поля имеют вынужденную природу и навязываются извне — через гравитационное влияние окружающих небесных тел на относительную динамику мантии, жидкого ядра и твердого ядра. Вынужденные эффекты близ полярных относительных смещений ядра, мантии и субъядра являются наиболее адекватными фундаментальным (или даже катастрофическим) изменениям магнитного поля в виде его экскурсов и планетарных инверсий [12, 20]. Геодинамическая модель [12, 13] характеризуется весьма высокой энергетикой возбуждения и взаимодействия ядра и мантии, на 3–4 порядка превосходящей энергетику приливных воздействий на слои Земли, и, что особенно важно, объясняет циклические вариации всех природных процессов в различных шкалах времени от часов до сотен миллионов лет [13]. В последние годы выполнены широкие исследования и получены новые эмпирические данные о циклических процессах на Земле и других планетах и спутниках, которые находятся в полном согласии с геодинамической моделью и подтверждают ее полномочность и достоверность [19, 22–24] и др.

В современную эпоху северный полярный дрейф определяет контрастное изменение формы южного и северного полушарий. В частности, он определяет различные тренды средних радиусов этих полушарий, удлине-

ние широтных кругов южного полушария и укорачивание широтных кругов северного полушария и другие эффекты [25]. В работе [18] обсуждалась кинематическая модель северной компоненты дрейфа континентов как причина расширения южного и сокращения северного полушарий Земли. Предсказываемые моделью пространственно-временные вариации вулканической и сейсмической активности Земли в современную эпоху [13], в частности миграция широтного пояса наибольшей сейсмической и вулканической активности Земли между северным и южным полушариями, получили четкие подтверждения (по данным наблюдений за последние примерно 100 лет) [26]. Дана геодинамическая интерпретация явлению зеркальности в сейсмической активности между северным и южным полушариями [27–29]. Кратко описанные приложения геодинамической модели [12, 13], список которых может быть продолжен, свидетельствуют о значимости модели, ее надежности и универсальности.

Применительно к обсуждаемой в статье проблеме о вековых изменениях уровня океана, опираясь на указанный геодинамический механизм, покажем, что береговые измерения и правильно интерпретируемые данные альтиметрических измерений, т.е. с учетом векового дрейфа центра масс, дают примерно один и тот же результат — средний глобальный уровень океана в последние 20–25 лет (т.е. в период альтиметрических измерений) возрос с средней скоростью около 1.6 мм/год.

В настоящей работе показана важная роль полярного дрейфа центра масс Земли в организации перераспределения океанических и атмосферных масс, в изменении среднего глобального уровня океана и в изменениях средних уровней океана в северном и южном полушариях. Смещение центра масс Земли к северу (в современную эпоху) порождает медленный вековой прилив океанических и атмосферных масс из южного полушария в северное. В результате анализа асимметричного расположения континентов по отношению к северному и южному полушариям Земли, деформационных изменений поверхности Земли, устанавливаемых по спутниковым GPS-наблюдениям, современных тепловых факторов увеличения объема океана и его теплового расширения была определена скорость векового нарастания среднего глобального уровня океана и выявлены контрастные (с различными вековыми скоростями) изменения его средних уровней в северном и южном полушариях. В северном полушарии Земли средний уровень океана возрастает со скоростью около  $2.45 \pm 0.32$  мм/год, а в южном полушарии средний уровень океана возрастает с существенно меньшей средней скоростью  $0.67 \pm 0.30$  мм/год. Полученное теоретическое значение скорости нарастания глобального уровня океана составляет  $1.61 \pm 0.36$  мм/год и хорошо согласуется с современными определениями этой характеристики из наблюдений на береговых приливных станциях. Выявленный асимметричный океанический прилив по направлению юг–север и его широтная зависимость также получили подтверждение в современных наблюдениях на береговых приливных станциях за последние примерно 25 лет.

### 1. О решении фундаментальных проблем геодинамики, небесной механики и геофизики на основе решения задачи М. В. Ломоносова о возможных смещениях притягивающего центра Земли

На возможность существования смещений центра масс Земли по отношению к ее поверхности впервые обратил внимание М. В. Ломоносов. Эти смещения могли бы быть «подмечены» показаниями специальных маятниковых приборов — гравиметров. М. В. Ломоносов фактически сформулировал обратную задачу гравиметрии — об определении возможных смещений центра масс планеты по показаниям гравиметрических приборов. Позднее ученые гравиметристы не раз обращали внимание на существование возможных смещений центра масс Земли и их отражений в показаниях гравиметров, однако существенного прогресса в решении фундаментальной проблемы не было достигнуто.

Полярный дрейф центра масс Земли к северу со скоростью около 1–2 см/год был теоретически предсказан автором в 1995 г.<sup>1</sup> в результате анализа вековых изменений грушевидной формы Земли (по значениям вековых вариаций зональных коэффициентов геопотенциала  $J_2$  и  $J_3$ ). Позднее это явление получило подтверждение методами космической геодезии [10–12]. В настоящей работе наблюдаемый вековой дрейф центра масс Земли принимается как эмпирический факт.

Более точно направление дрейфа (по направлению к полуострову Таймыр) также было предсказано автором теоретически в результате анализа направленного перераспределения масс Земли, соответствующего смещению центра масс Земли, при объяснении неприливного ускорения ее осевого вращения и векового дрейфа полюса Земли и с использованием современных данных о вариациях коэффициентов геопотенциала [30–32].

Описанное явление дрейфа центра масс фактически дает ответ на вопрос, сформулированный М. В. Ломоносовым, о реальности смещения притягивающего центра Земли. С другой стороны, на основе этого явления и специально разработанной геодинамической модели вынужденных относительных колебаний оболочек Земли [12,13] были решены фундаментальные проблемы геодинамики и небесной механики.

Получили динамическую интерпретацию и объяснение явления векового дрейфа полюса оси вращения Земли, и неприливное ускорение ее осевого вращения [32]. Объяснены наблюдаемые в современную эпоху вековые вариации коэффициентов геопотенциала [30], геодезические изменения Земли в современную эпоху, наблюдаемые вековые вариации силы тяжести [31] и др. В настоящей работе дается объяснение вековому изменению глобального уровня океана и изменениям средних уровней океана в северном и южном полушариях Земли.

### 2. Тренд центра масс Земли

Вековой тренд центра масс Земли определяется по данным спутниковых высокоточных наблюдений в последние примерно 17 лет. Тренд центра масс происхо-

дит по направлению к северу (в принятой мантийной системе координат данной эпохи). Нами была вычислена скорость тренда центра масс по данным наблюдений спутниковой системы DORIS в период 1999–2008 гг. (по данным международной службы вращения Земли IERS). В частности, для полярной компоненты этой скорости была получена оценка  $5.24 \pm 0.29$  мм/год [31]. Оказывается, что все имеющиеся данные о современных медленных перераспределениях поверхностных масс Земли не позволяют объяснить указанное фундаментальное планетарное явление (объясняются примерно 4% наблюдаемого значения). Это послужило сигналом для западных ученых к отказу от самого явления, что привело в дальнейшем к жесткой кризисной ситуации в целом ряде наук о Земле, включая современную климатологию. Однако дрейф центра масс Земли легко и естественно объясняется, если допустить, что аналогичный дрейф примерно в том же направлении совершает центр масс ядра Земли относительно центра масс вязко-упругой мантии (или всей Земли) со скоростью 2–3 см/год [10, 32]. Мы допускаем, что указанные смещения возможны благодаря вязко-упругим, диссипативным и термодинамическим свойствам пограничного слоя между ядром и мантией Земли, известного в геодинамике как слой  $D''$ . Указанные смещения имеют вынужденный характер и совершаются под гравитационным воздействием внешних небесных тел на несферичные и несбалансированные оболочки Земли [15, 16]. В настоящей работе мы не останавливаемся на детальном изучении механизма векового дрейфа центра масс, а принимаем его как эмпирический факт. И рассматриваем его как отражение векового дрейфа центра масс ядра в северном направлении по отношению к мантии. Наша задача — изучить геодинамические следствия дрейфа центра масс Земли (и соответственно дрейфа ядра). В частности, изучить его влияние на планетарное поведение океана как на его глобальный средний уровень, так и на средние уровни океана в северном и южном полушариях.

Ядро Земли характеризуется большой избыточной массой (около 17 масс Луны), обусловленной разницей средней плотности жидкого ядра и плотности при подошве мантии [32]. Поэтому дрейф ядра приводит к важным геодинамическим и геофизическим последствиям, в частности к нарастанию силы тяжести в северном полушарии со скоростью около 1 мкГал/год и к убыванию (примерно с такой же по величине скоростью) в южном полушарии. Этот вывод уже получил подтверждения в высокоточных гравиметрических наблюдениях последних 5–15 лет на ведущих станциях мира [31]. Естественно, что дрейф центра масс Земли (а по нашей геодинамической модели, и дрейф центра масс ядра относительно центра масс мантии) приводит к дополнительным гравитационным воздействиям на все слои упругой мантии, а точнее к инверсионным изменениям их напряженных состояний и деформациям. Например, если в одной полусфере (северной) эти напряжения возрастают, то в противоположной (южной) убывают. Планетарные деформации планеты,

<sup>1</sup> В указанной статье была допущена опечатка в единицах измерения «век–год», исправленная в последующих публикациях автора (например, в [31]). Обозначения скоростей в см/век в работе [9] следует заменить на см/год.

обусловленные смещениями ядра, также имеют противоположные тенденции по отношению к северному и южному полушариям Земли. Были выполнены исследования колебаний системы ядро–мантия Земли под действием гравитационного притяжения Луны и Солнца [33]. Было предсказано явление укорачивания длин широтных кругов в северном полушарии и удлинения широтных кругов в южном полушарии [34] и выявлено контрастное изменение средних радиусов южного и северного полушарий Земли. Указанные геодезические изменения фигуры Земли в современную эпоху получили подтверждения по данным высокоточных GPS наблюдений, проведенных за последние 10–15 лет [25]. Все перечисленные явления представляют собой геодинамические и геофизические следствия векового дрейфа центра масс Земли.

### 3. Океанический и атмосферный инверсионный прилив

#### 3.1. Океанический инверсионный прилив

Океанический инверсионный прилив характеризуется несколькими составляющими. Значительный вклад вносит смещающаяся избыточная гравитирующая масса ядра. По нашим оценкам, она вызывает полярный дрейф центра масс Земли со скоростью  $5.07 \pm 0.53$  мм/год. Смещающееся ядро также деформирует все слои мантии. При этом возникает дополнительный гравитационный потенциал, дающий определенный вклад в прилив, а также деформируется поверхность Земли (и дно океана). Но последние два фактора (обусловленные гравитационным влиянием подвижного ядра) являются малыми, поскольку характеризуются числами Лява порядка  $(-2)$ :  $k_{-2} = -0.0050$ ,  $h_{-2} = 0.0062$  [7, 8, 31]. В отличие от последних двух факторов все периферийные перераспределяемые массы Земли (атмосферные, океанические, флюидные) также вносят вклад в смещение центра масс Земли к северу. Однако суммарный эффект является малым и может быть оценен в настоящее время лишь приблизительно (по нашим предварительным оценкам, вклад в скорость векового дрейфа центра масс составляет  $0.13 \pm 0.16$  мм/год). Дополнительный потенциал создает также нагрузка на поверхность Земли. Особо следует учесть деформацию поверхности, вызываемую нагрузкой.

Прилив океана от гравитирующего и смещающегося ядра впервые был описан автором в 2000 г. и изучен в работах [7, 8]. Этот прилив является асимметричным (инверсионным). Он зависит от широты и характера смещения ядра. Если в северном полушарии он нарастает, то в противоположном — южном — он убывает. В рамках квазистатического приближения и в случае полярного смещения ядра высота этого прилива описывается формулой [7, 8]:

$$\delta h = (1 + k_{-2} - h_{-2}) \frac{\Delta m_c}{m_{\oplus}} \delta \rho (\cos \theta + \delta) = 0.1910 \cdot \delta \rho (\cos \theta + \delta). \quad (1)$$

Здесь  $\delta \rho$  — вариация расстояния между центрами масс ядра и мантии Земли. Избыточная масса ядра, обусловленная контрастом плотностей ядра и мантии, вычислена на основе известной модели строения Земли ПРЕМ и составляет  $\Delta m_c = 0.1932 \cdot m_{\oplus}$  [7, 8];  $m_{\oplus}$  —

масса Земли. Фактор  $\delta$  в формуле (1) определяется из условия сохранения объема водных масс при инверсионном приливе:

$$\int_0^{\pi} (\cos \theta + \delta) \sin \theta \Sigma_O^{(0)} d\theta = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\Sigma_O^{(0)}$  — зональная часть океанической функции [35]:

$$\Sigma_O^{(0)}(\theta) = a_{00} + a_{10}P_{10}(\theta) + a_{20}P_{20}(\theta) + a_{30}P_{30}(\theta) + a_{40}P_{40}(\theta) + \dots,$$

$P_{n0}(\theta)$  — полиномы Лежандра,  $a_{n0}$  — ненормированные значения коэффициентов океанической функции. Численные значения этих коэффициентов известны (в частности,  $a_{10} = -0.2182$ ) [35]. В результате вычисления интегралов в (2) находим значение  $\delta = 0.1044$ .

Формула (1) пригодна для исследования приливов вследствие векового тренда центра масс Земли, а также вследствие его колебательных движений, например с годовым периодом. Учитывая лишь гравитационное влияние центра масс ядра Земли при его вековом тренде и не рассматривая пока влияние атмосферного прилива, изменения гравитационного потенциала и фигуры Земли, вызванных тем же фактором, для скорости векового изменения инверсионного прилива в зависимости от дополнения до широты  $\theta$  получаем следующее приближенное представление:

$$\dot{H}_O = \dot{H}_O^{(0)} (\cos \theta + \delta), \quad \dot{H}_O = 5.14 \pm 0.38 \text{ мм/год}. \quad (3)$$

Основываясь на данных спутниковых наблюдений системы ДОРИС (данные международной службы вращения Земли IERS), для скорости полярного дрейфа центра масс Земли примем значение  $v_C = 5.24 \pm 0.29$  мм/год. При этом соответствующая скорость дрейфа центра масс ядра оценивается в  $v_{\text{core}} = 26.2 \pm 2.7$  мм/год [32].

Из последней формулы следует, что глобальный уровень океана из-за инверсионного гравитационного прилива, вызванного смещающимся ядром, меняется со средней скоростью  $\dot{h}_O^{\text{core}} = \dot{H}_O^{(0)} \delta = 0.537 \pm 0.039$  мм/год. Образно выражаясь, водные океанические массы, нагнетаемые ядром из южного полушария в северное в современную эпоху, не находят достаточного места для размещения из-за присутствия обширных континентальных масс в северном полушарии и тем самым принуждаются гравитационным полем Земли участвовать в общем подъеме уровня океана.

#### 3.2. Атмосферный вековой прилив из южного в северное полушарие

Смещающийся к северу центр масс своим гравитационным притяжением увлекает все флюидные массы (в первую очередь океанические и атмосферные) смещаться из южного полушария в северное. С позиций геодинамической модели [13] указанное перераспределение масс осуществляется гравитационным притяжением дрейфующего к северу ядра. Именно ядро наводит инверсионный прилив атмосферных и океанических масс из южного полушария в северное полушарие. По нашим теоретическим оценкам, основанным на теории

статических приливов, среднее атмосферное давление в северном полушарии возрастает со скоростью около 0.17 мбар/год, а в южном полушарии среднее атмосферное давление наоборот убывает примерно с такой же скоростью [7]. Выполненные оценки имеют предварительный характер, но они уже получили подтверждения в данных современных метеорологических наблюдений в период 01.04.2002–01.04.2005: 0.17–0.22 мбар/год (северное полушарие) и –0.18 мбар/год (южное полушарие) [36]. Следует отметить, однако, что указанные характеристики были получены для сравнительно короткого интервала времени наблюдений, но они подтверждаются данными многолетних метеорологических наблюдений за последние 60 лет за изменениями среднего атмосферного давления в южном полушарии, которые указывают на медленное убывание среднего атмосферного давления южного полушария со скоростью около 0.15–0.17 мбар/год [37]. Тем не менее эти данные нуждаются в дополнительных исследованиях, особенно данные об изменении среднего атмосферного давления северного полушария.

Воздушные массы, перебрасываемые из южного полушария в северное, соответствуют некоторому модельному инверсионному «купольному» приливу. Ему можно сопоставить эквивалентный прилив воды, для которого скорость подъема воды определяется в зависимости от ко-широты формулой

$$\dot{H}_A = \dot{H}_A^{(0)} \cos \theta, \quad (4)$$

где  $\dot{H}_A^{(0)} = 3.4004$  мм/год — максимальная скорость нарастания прилива в районе Северного полюса. Барометрический эффект влияния атмосферного прилива приведет к уменьшению ожидаемого океанического прилива, описанного в п. 3.1. Соответствующие эффекты рассчитываются по формулам (1)–(4) и позволяют описать результирующий океанический прилив, т.е. уже с учетом влияния векового изменения атмосферы.

Нарастание атмосферного давления в северном полушарии приводит к частичному вытеснению океанических масс в южное полушарие. В результате этого средний уровень океана в северном полушарии убывает со скоростью –1.54 мм/год. В свою очередь убывание атмосферного давления в южном полушарии приводит к возрастанию среднего уровня океана в этом полушарии со скоростью 1.73 мм/год. Предварительные оценки показали, что океанический инверсионный прилив, вызванный гравитационным притяжением дрейфующего ядра, дает основной вклад в явление векового изменения среднего уровня океана в N/S полушариях. Так, средний уровень океана в северном полушарии возрастает со скоростью 3.02 мм/год, а средний уровень океана в южном полушарии убывает со скоростью –3.38 мм/год. Рассматривая теперь результирующий прилив (с океанической и атмосферной составляющими), приходим к выводу, что скорость возрастания среднего уровня океана в северном полушарии составляет 1.62 мм/год.

Современные данные спутниковой альтиметрии за период 1993–2007 гг. также подтвердили контрастный характер изменений средних глобальных уровней в северном и южном полушариях Земли [6]. Более того, было показано, при устранении ошибок в интерпретации

данных альтиметрических наблюдений уровня океана, теоретические оценки скоростей нарастания средних уровней океана в северном и южном полушариях совпадают со «скорректированными» альтиметрическими оценками [7, 8].

Кроме описанных выше составляющих в изменении уровня океана (океанический и атмосферный приливы) в данной работе используются эмпирические данные об изменении дна мирового океана по отношению к дрейфующему центру масс Земли, а также наиболее надежные данные о влиянии тепловых (климатических) факторов на возрастание глобального уровня океана.

### 3.3. Нарастание глобального уровня океана из-за планетарных деформаций дна океана

Современные данные GPS наблюдений позволяют оценить изменения поверхности Земли (и ее полушарий) непосредственно по отношению к подвижному центру масс планеты. На океанических пространствах эти изменения следует рассматривать как изменения дна океана, поскольку они отнесены к дрейфующему центру масс Земли и приводят к изменениям глобального уровня океана наряду с рассмотренными выше океаническим и атмосферными приливами. Были сделаны первые оценки этого трудно учитываемого эффекта. Из-за дрейфа ядра меняются расстояния от точек дна до центра масс всей Земли, причем также с противоположными тенденциями: в северном полушарии дно опускается, а в южном — наоборот поднимается. Эти изменения не являются деформациями дна океана, а отражают лишь смещение центра масс Земли. Дно океана испытывает также глобальные (планетарные) деформации, отражающие общие изменения фигуры Земли и ее гравитационного поля, изменения формы полушарий Земли в современную эпоху. Последние были оценены на основе геодинамической модели вынужденных относительных колебаний и дрейфа ядра Земли по отношению к упругой мантии [13] и получили подтверждение по данным спутниковых наблюдений методами космической геодезии [25]. На основе этих результатов была получена предварительная оценка скорости нарастания глобального уровня океана только за счет деформации дна  $0.55 \pm 0.26$  мм/год.

Скорости вековых изменений средних радиусов полушарий Земли (и дна океана) по модели автора I [7] и по модели II [25] имеют значения:

- I.  $\dot{u}_N = 0$  мм/год,  
 $\dot{u}_S = 2.74 \cos \theta$  мм/год;
- II.  $\dot{u}_N = (0.88 \pm 0.12) \cos \theta$  мм/год,  
 $\dot{u}_S = (2.84 \pm 0.22) \cos \theta$  мм/год.

Указанные модели изменения полушарий Земли являются на сегодня единственными и в общих чертах согласуются между собой. Для анализа указанных эффектов использовались международные базы данных GPS наблюдений при независимой выборке станций наблюдений общим количеством около 100. Обе модели указывают на увеличение среднего радиуса Земли по отношению к ее дрейфующему центру масс со скоростями 0.23 мм/год и 0.63 мм/год соответственно.

Поскольку изменения поверхности Земли (в частности дна океана) отнесены к центру масс, то представ-

ляется возможным оценить объемы воды, вытесняемые этими изменениями, и получить предварительные оценки изменения уровня океана, как глобального, так и для северного и южного полушарий Земли.

В результате вычисления соответствующих интегралов по поверхности океана была получена формула для скорости нарастания среднего уровня океана вследствие изменений его дна (по отношению к подвижному центру масс):

$$\begin{aligned} \overline{h}_O^{\text{bd}} &= \frac{r_{\oplus}^2}{S_O} \iint_0 u_r^{(0)} \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\lambda = \\ &= \frac{2\pi r_{\oplus}^2}{S_O} u_r^{(0)} \int_0^{\pi} \cos \theta \sin \theta \Sigma_O^{(0)} \, d\theta, \quad (5) \end{aligned}$$

где изменение формы Земли задается уравнением  $u = u_r^{(0)} \cos \theta$  со значениями амплитуд  $u_r^{(0)}$  для моделей I и II;  $S_O$  — площадь океана. Интегрирование в (5) распространяется на площадь всего океана. Вычисляя интеграл (5), получаем значение средней скорости нарастания глобального уровня океана (по отношению к дрейфующему центру масс):  $\overline{h}_O^{\text{bd}} = 0.81$  мм/год (модель I) и  $\overline{h}_O^{\text{bd}} = 1.01 \pm 0.09$  мм/год (модель II). Указанная составляющая присутствует в альтиметрических (спутниковых) измерениях уровня океана и в определенной мере объясняет большое значение альтиметрической скорости нарастания глобального уровня океана. В береговых измерениях (относительного уровня океана) обсуждаемый эффект проявляется слабее, особенно в южном полушарии, поскольку вместе с уровнем океана испытывают определенный подъем сами береговые линии по отношению к подвижному центру масс. Оценить эффект в этом случае сложнее. Ограничимся простыми оценками береговых эффектов нарастания уровней океана в северном и южном полушариях. Для северного полушария можно принять значение подобной скорости равное  $\overline{h}_{ON}^{\text{bd}} = 0.81$  мм/год, а для южного полушария средняя скорость повышения уровня океана отстает от средней скорости подъема дна.

### 3.4. Тепловые факторы повышения глобального уровня океана

Несмотря на значительный прогресс в методах исследования океана, фундаментальный вопрос о механических и физических причинах постоянного возрастания уровня океана решается на разных научных форумах едва ли не голосованием. Если отбросить в сторону спекулятивные дискуссии о большой роли наблюдаемого потепления, то все равно остается неразрешимая проблема. Она даже получила название «Attribution problem» [38]. Дело в том, что в настоящее время признано доказанным точно, что потепление действительно приводит к повышению уровня океана. Однако это повышение характеризуется скоростью не более  $0.4 \div 0.7$  мм/год, в то время как наблюдаемый подъем уровня океана оценивается наземными и спутниковыми методами в  $1.6$  и  $3.4$  мм/год [1–5]. В результате ученые «нащупали» большую необъяснимую брешь в модельных и наблюдаемых значениях для скорости возрастания

среднего уровня океана. Поскольку подходящего механизма не нашлось для объяснения этой брешки, то проблема получила название «attribution problem» — проблема потерянного механизма возрастания уровня океана.

Достоверных данных о вкладе таяния ледников в повышение уровня океана до недавнего времени не было, и предпринимались лишь многочисленные попытки оценить этот эффект. По данным современных наблюдений спутника GRACE ледовый щит Гренландии дает основной вклад в нарастание уровня океана  $0.36 \pm 0.04$  мм/год, западная часть Антарктиды дает вклад  $0.30 \pm 0.06$  мм/год, в то время как восточная часть Антарктиды дает компенсирующую составляющую  $-0.19 \pm 0.07$  мм/год. Полный суммарный эффект от таяния ледников составляет  $0.47 \pm 0.1$  мм/год. Остальные ледники — поставщики водных масс из-за потепления, дают меньшие вклады [1, 37].

С другой стороны, по данным работы [36], тепловое расширение океана никак не превосходит значение  $0.5$  мм/год, а вклад в повышение уровня океана за счет таяния ледников и иных поступлений в воды океана и того меньше.

Ко времени второй оценки Международной группы по изменению климата (МГИК) в 1995 году, казалось, было мало разногласия в отношении глобального повышения уровня моря (GSLR). Большинство оценок различных авторов приходилось на диапазон  $1.5\text{--}2.0$  мм/год. Многими учеными поддерживалось предположение, что большая часть этого роста вызвана потеплением океана, а оставшаяся часть связана с таянием материкового льда. Однако третья оценка МГИК в 2001 г. привела к краху этого общественного мнения: новые и более точные оценки влияния потепления на уровень океана существенно уменьшили компоненту увеличения объема океана до  $0.5$  мм/год [8], а массовая компонента, вызванная таянием ледников, дает вклад и того меньше. Таким образом, был выявлен большой необъяснимый разрыв между прямой и косвенной оценками скорости нарастания уровня океана — «attribution problem» [38].

Таким образом, тепловые факторы играют существенную роль в вековом изменении уровня океана, но не объясняют наблюдаемого возрастания глобального уровня океана. Здесь мы используем современные данные, которые свидетельствуют, что прогревание океана и его расширение в совокупности с таянием ледников и другими поступлениями вод в океан приводят к нарастанию среднего глобального уровня океана со скоростью около  $0.87$  мм/год. Хотя и эта оценка нуждается в уточнении в будущих исследованиях.

### 4. Контрастные изменения средних уровней океана в северном и южном полушариях

В пп. 3.1.–3.3 был описан своеобразный инверсионный вековой атмосферный прилив, существование и организация которого уже подтверждается данными современных наблюдений [36, 37]. Гравитационное влияние смещающегося центра масс (или, точнее сказать, гравитационное притяжение дрейфующего ядра Земли) вызывает аналогичный по своим свойствам океанический прилив [32]. Барометрический эффект перераспре-

деляемых атмосферных масс приводит к уменьшению океанического прилива. Действительно, возрастание среднего атмосферного давления в северном полушарии приведет к частичному вытеснению океанических масс в южное полушарие. Только по одной этой причине (по рассматриваемой модели) средний уровень океана в северном полушарии уменьшается со скоростью  $-1.98$  мм/год. В свою очередь убывание среднего атмосферного давления в южном полушарии приводит к возрастанию среднего уровня океана в южном полушарии со скоростью  $1.43$  мм/год. Предварительные оценки показали, что океанический инверсионный прилив, обусловленный гравитационным притяжением дрейфующего ядра, дает основной вклад в явление векового изменения средних уровней северного и южного полушарий (в северном полушарии средний уровень океана возрастает со скоростью  $3.01 \pm 0.17$  мм/год, а в южном полушарии средний уровень океана убывает со скоростью  $-2.18 \pm 0.12$  мм/год). Подчеркнем, что здесь речь идет отдельно об океаническом приливе (без учета атмосферного влияния).

Суммируя все рассмотренные факторы нарастания среднего уровня океана (с учетом тепловой составляющей), мы приходим к важному заключению. В северном полушарии средний уровень океана возрастает со скоростью около  $2.45 \pm 0.32$  мм/год, а в южном полушарии лишь со скоростью около  $0.67 \pm 0.30$  мм/год. Этот результат получает подтверждение по данным наблюдений за уровнем океана на береговых станциях в последние примерно 20 лет из работы [6]. Тем самым получает подтверждение сам южно-северный океанический прилив [7, 8, 31]. Соответствующее теоретическое значение скорости нарастания среднего глобального уровня океана составляет  $1.61 \pm 0.36$  мм/год и хорошо согласуется с данными береговых наблюдений.

### 5. Широтная зависимость изменения среднего уровня океана

В силу специфики океанического инверсионного векового прилива должна наблюдаться зависимость скорости нарастания океанического прилива юг-север от широты (1), (2). Теоретическая зависимость этой скорости представлена кривой на рис. 1 и хорошо подтверждается данными береговых наблюдений за вековыми изменениями уровня океана в последние примерно 20 лет для достаточно крупных регионов мирового океана [6], приведенными на рис. 2.

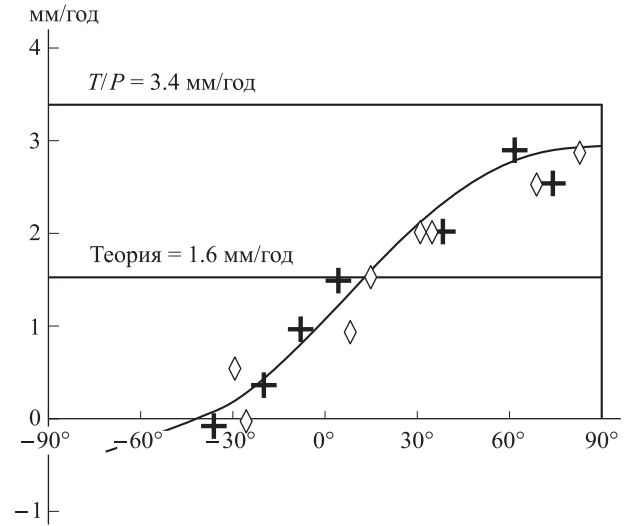


Рис. 1. Теоретическая кривая зависимости скорости нарастания уровня океана в зависимости от широты в сравнении с наблюдаемыми значениями для регионов мирового океана, которые отмечены крестами и ромбами

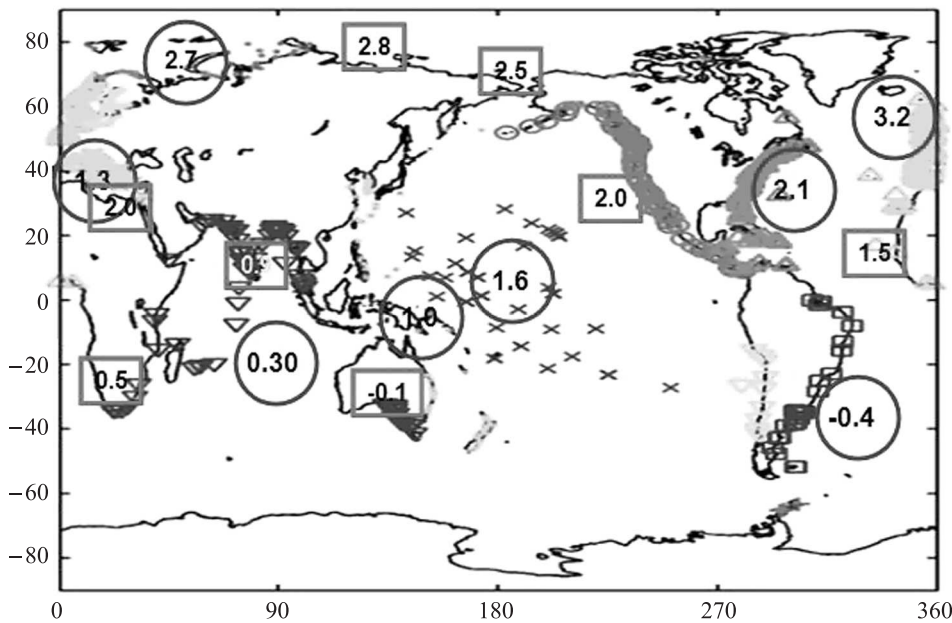


Рис. 2. Регионы океана, для которых использовались оценки средних скоростей изменения уровня океана. Значения скоростей, указанные внутри кружков и квадратов, соответствуют условным центрам указанных регионов океана и вычислены для альтиметрического периода наблюдений (примерно за последние 20–25 лет) на основе данных, приведенных в работе [6]

Результаты, представленные в статье, позволяют интерпретировать и дать геодинамическое объяснение наблюдаемым медленным изменениям уровня океана. Они опираются на фундаментальное явление векового дрейфа центра масс Земли в северном направлении [31, 32]. Более того, полученные результаты описывают новые и более тонкие эффекты планетарного поведения океана, а именно асимметрию и инверсию в медленном нарастании уровня океана по отношению к северному и южному полушариям Земли. Эти явления, как и другие геодинамические, геофизические и геологические явления, кратко описанные во введении, однозначно свидетельствуют в пользу реальности дрейфа центра масс Земли — фундаментального геодинамического явления.

### Заключение

Некоторые подтверждения предсказанному явлению перераспределения флюидных масс между полушариями приводятся в публикации [40]. Приведем цитату из указанной работы: «Довольно уверенно определяется, что на шельфах Северного Ледовитого океана усредненное давление на дно возрастает. Это означает, что мы наблюдаем перераспределение океанических масс из южного полушария в северное полушарие и смещения масс ближе к оси вращения Земли. Таким образом, потепление океана и последующее перераспределение его водных масс приводит к вариации длительности суток на величину  $-0.12$  мс в течение 200 лет. Иными словами, океаны способны возбуждать неприливные вариации длительности суток с периодами в десятки лет и более».

Одна из первых попыток западных ученых разоблачить в противоречиях между береговыми и спутниковыми определениями скорости нарастания глобального уровня океана содержится в статье [41]. В этой статье, хотя и в несколько завуалированной форме, имеется указание на ошибочность альтиметрических определений скорости повышения уровня океана. Приведем цитату из указанной работы: «Кроме того, Prandi и др. [2009] не обнаружили существенных различий между береговыми измерениями скорости повышения уровня океана и среднего глобального повышения уровня моря, сравнивая данные мареографов и данные спутниковой альтиметрии за период 1993–2007 гг. [...] Улучшение нашего понимания повышения уровня моря и его изменчивости, а также снижение связанных с этим неопределенностей в решающей степени зависит от выбора стабильной глобальной системы координат, связанной с Землей. Точность определения ее начала и масштаба является основным фактором, ограничивающим определение геоцентрических тенденции в изменениях уровня океана в эпоху альтиметрических измерений. Для постепенного повышения точности выбора земной системы координат важно продолжение миссии и усилий международных служб, подобных IGS».

Даны геодинамическая интерпретация и объяснение явлениям возрастания среднего глобального уровня океана в современную эпоху и контрастного векового изменения средних уровней океана в северном и южном полушариях, предсказанному ранее автором на основе наблюдаемого векового тренда центра масс Земли в се-

верном направлении со скоростью 5–6 мм/год. Признаки перераспределения флюидных масс между северным и южным полушариями наблюдаются на других телах Солнечной системы (Марс, Титан и др.). Соответствующие явления перераспределения атмосферных и жидких масс между указанными полушариями являются вполне ожидаемыми [42], а наблюдаемые процессы на телах Солнечной системы фактически свидетельствуют об универсальности механизма вынужденных относительных колебаний и смещений основных оболочек небесных тел (ядра и мантии).

### Список литературы

1. Cazenave A., Dominh K., Guinehut S. et al. // *Global and Planetary Change*. 2009. **65**. P. 83.
2. Chen J.L., Wilson C.R., Hu X.G., Tapley B.D. // *Geophys. Res. Lett.* 2003. **30(20)**. P. 2024. doi:10.1029/2003GL018048.
3. Chung-Yen K. // Report N 471. Geodetic Science and Surveying. Department of geological sciences. The Ohio State University, Columbus, Ohio. 2006. 43210.
4. Cazenave A., Nerem R.S. // *Rev. Geophys.* 2004. **42**. RG3001. doi: 10.1029/2003RG000139.
5. Nerem R., Merrifield, Mitchum G.T., Hamlington B.D. // *Eos Trans. AGU*. 2010. **91(26)**, Meet. Am. Suppl. Abstract OS22-01.
6. Jevreeva S., Grinsted A., Moore J.C., Holgate S. // *J. Geophys. Res.* 2006. **111**. C09012. doi: 10.1029/2005JC0032 29.
7. Баркин Ю.В. // Геология морей и океанов: Матер. XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М., 2007. **IV**. С. 18.
8. Баркин Ю.В. // Геология морей и океанов: Матер. XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М., 2009. **V**. С. 183.
9. Баркин Ю.В. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 1995. № 5. С. 99.
10. Barkin Yu.V. // IERS Technical Note 25. IERS Analysis Campaign to Investigate Motions of the Geocenter / Ed. by J. Ray. Observatoire de Paris. April 1999. P. 3.
11. Tatevian S.K., Kuzin S.P., Kaftan V.I. // *Proc. Conf. AOGS*. Singapore, 5–9 July 2004. Singapore, 2005. P. 17.
12. Баркин Ю.В. // *Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера*. Т. 2. М., 1999. С. 46.
13. Баркин Ю.В. // *Изв. секции наук о Земле РАЕН*. 2002. **9**. С. 45.
14. Хаин В.Е. // *Геология и геофизика*. 2010. **51**, № 6. С. 753.
15. Летников Ф.А. // *Докл. РАН*. 2001. **378**, № 3. С. 387.
16. Божко Н.А. // *Вестн. Моск. ун-та. Геология*. 1992. № 1. С. 27.
17. Божко Н.А., Баркин Ю.В. // *Матер. 42-го Тектонич. совещания*. М., 2009. С. 66.
18. Гончаров М.А. // *Ротационные процессы в геологии и физике*. М., 2007. С. 279.
19. Хаин В.Е., Гончаров М.А. // *Геотектоника*. 2006. № 5. С. 3.
20. Гончаров М.А., Разницин Ю.Н., Баркин Ю.В. // *Науч. конф. «Ломоносовские чтения 2010»*. Секция «Геология»: Тезисы. М., 2010 (<http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1183766&uri=44.html>).
21. Pavlenkova N.I. // *Boll. Soc. Geol. It.* 2005. Volume Speciale. N 5. P. 1.
22. Баркин Ю.В. // *Нелинейный мир*. 2007. № 1–2. С. 110.
23. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. *Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа*. М., 2009.
24. Тихонов И.Н. // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 3. С. 71.



25. Кафтан В.И., Цыба Е.Н. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2009. № 1. С. 33.
26. Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П. и др. // Новые технологии. Физика. 2010. 2, № 2. С. 3.
27. Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. // Докл. АН СССР. 1994. 338. С. 525.
28. Левин Б.В., Сасорова Е.В. // Докл. РАН. 2009. 426, № 4. С. 1.
29. Фридман А.М., Поляченко Е.В., Насырканов Н.Р. // УФН. 2010. 180, № 3. С. 303. doi: 10.3367/UFNr.0180.2011003f.0303.
30. Cheng M.K., Shum C.K., Tapley B.D. // J. Geophys. Res. 1997. 102, N B10. P. 22377.
31. Баркин Ю.В. // Геофизич. исследования. 2010. 11, № 3. P. 46.
32. Баркин Ю.В. // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики: Матер. XLI Тектонич. совещания. Т. 1. М., 2008. С. 55.
33. Barkin Yu.V., Vilke V.G. // Astron. Astrophys. Trans. December 2004. 23, N 6, P. 533.
34. Barkin Yu.V., Shatina A.V. // Astron. Astrophys. Trans. June 2005. 24, N 3. P. 195.
35. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М., 2002.
36. Бурлуцкий Р.Ф. // Матер. Сагитовских чтений. М., 2007 (<http://www.sai.msu.ru>).
37. Keith H.M., Bromwich D.H., Marshall G.J. // J. Climate. 2000. 13. P. 3940.
38. Miller L., Douglas B.C. // Nature. March 2004. 428. P. 406.
39. Ramillien G., Lombard A., Cazenave A. et al. // Interannual variations of the mass balance of the Antarctica and Greenland ice sheets from GRACE. 1 February 2008. 266, N 1–2. P. 140.
40. Landerer F.W., Jungclaus J.H., Marotzke J. // Geophys. Res. Lett. 2007. 34, N 6. L06307.
41. Woppelmann G., Letetrel C., Santamaria A. et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. 36. L12607. doi:10.1029/2009GL038720.
42. Barkin Yu.V. // Proc. Intern. Conf. «Astronomy and World Heritage: across Time and Continents». Kazan, 19–24 August 2009. Kazan, 2009. P. 142.

### **An explanation of secular changes of mean global sea level and mean sea levels in northern and southern hemisphere of the Earth**

**Yu. V. Barkin**

*P. K. Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.  
E-mail: barkin@inbox.ru.*

The problem about increasing of the mean global level of ocean in present epoch is solved. The explanation is given to the phenomenon of contrast secular changes of mean sea levels of ocean in northern and southern hemispheres, predicted earlier by author on the basis of an observable secular trend of the center of mass of the Earth in northern direction with a velocity about 5–6 mm/year.

*Keywords:* global sea level, variations of sea level, northern and southern hemispheres, secular oceanic tide.

PACS: 92.70.Jw.

*Received 16 September 2010.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2011).

#### **Сведения об авторе**

Баркин Юрий Владимирович — докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотр.; e-mail: barkin@inbox.ru.