

АНАЛИЗ ДАННЫХ ЗЕМНОПРИЛИВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЯПОНСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ SYOWA

канд. физ.-мат. наук Е.А. СПИРИДОНОВ, науч. сотр. О.Ю. ВИНОГРАДОВА
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, e-mail: sp287@mail.ru

В ходе тестирования новой отечественной программы прогноза земноприливных наблюдений ATLANTIDA3.1_2014 были подвергнуты значительной дополнительной обработке данные гравиметрических наблюдений на антарктической японской станции Syowa (Kim et al., 2011). Прежде всего, эти данные интересны в связи с достаточно высокой широтой расположения пункта ($69,007^\circ$ ю.ш.). Это позволило, в частности, с большей достоверностью сравнить два широтных распределения гравиметрических амплитудных дельта-факторов для Земли без океана: полученного при построении широко известной модели DDW/NH (Dehant et al., 1999) и рассчитанного в работе (Spiridonov, 2014). В то же время находящийся на станции стабильный и точный сверхпроводящий гравиметр установлен всего в 250 м от береговой линии, т.е. в значительной степени подвержен влиянию океана. В связи с этим интерес также представляла проверка работоспособности в Антарктике современных океанических приливных моделей (в частности, FES2012).

В результате проведенного анализа было выяснено, что наилучшей океанической приливной моделью в антарктическом поясе является TPXO7.2. Это совпадает с результатами работы (Kim et al., 2011). Однако в целом разброс результатов, получаемых по различным океаническим моделям, оказался достаточно велик. Тем не менее было показано, что в высоких широтах, вне зависимости от выбора океанической приливной модели, применение теоретических амплитудных дельта-факторов для Земли без океана модели DDW/NH более чем в 70 % случаев приводит к более далеким от наблюдений результатам, нежели применение амплитудных факторов нашей модели.

Ключевые слова: океанический нагрузочный эффект, приливные амплитудные дельта-факторы.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее точные гравиметрические наблюдения в Антарктиде, как, видимо, и в целом в высоких широтах, были проведены на сверхпроводящем гравиметре TT70#016 на японской станции Syowa в период с 01.01.94 по 31.12.02. Гравиметр установлен на основных метаморфических гранитных породах и не подвержен влиянию подземных вод и почвенной влаги (Iwano et al., 2005). Координаты станции — широта: $69,007^\circ$ ю.ш.; долгота: $39,586^\circ$ в.д., высота над уровнем моря +21,493 м. В то же время инструмент находится всего в 250 м от береговой линии, что приводит к существенному влиянию на результаты наблюдений океана.

Результаты обработки данных, полученных на станции Syowa, наиболее полно рассмотрены в работе (Kim et al., 2011). Помимо этого, в работе (Boy et al., 2003) дан анализ полуторагодовых (с июля 1997 г. по декабрь 1998 г.) наблюдений на этом пункте.

При проведении сопоставления наблюдений с теорией авторы указанных работ применяли значения амплитудных дельта-факторов приливных волн для Земли без океана из широко известной модели DDW/NH Вероники Дехант (Dehant et al., 1999), а также широкий набор океанических приливных моделей.

Так, для получения экспериментальных значений амплитуд и фаз различных приливных волн Тэ-Хи Ким (Kim et al., 2011) в качестве программы приливного анализа применял пакет БАУТАР-G (Tamura et al., 1991) и рассматривал шесть океанических приливных моделей: CSR3.0, GOT99.2b, NAO.99b, FES2004, TPXO7.1 и TPXO7.2. Суммарный океанический гравиметрический эффект при этом рассчитывался при помощи пакета GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001), в котором точность интегрирования зависит от точности океанической приливной модели, базы данных распределения море–суша и массовой нагрузочной функции Грина. После ряда пробных расчетов были применены комплексные функции Грина, рассчитанные в работе (Okubo, Tsuji, 2001). Эти расчеты основаны на модели полос поглощения (ABM) (Anderson, Given, 1982), в которой были учтены влияния на функцию Грина эффектов внутреннего строения и неупругости Земли, а также эффекты колебательной точечной нагрузки на суточных и полусуточных периодах.

Из сравнения с наблюдаемым океаническим эффектом, а также данными наземных океанографических измерений, наиболее оптимальной Ким (Kim et al., 2011) признает океаническую приливную модель TPXO7.2. Полученное суммарное (по всем волнам) среднеквадратическое отклонение от наблюдений составило для этой модели 0,194 мГал.

Здесь необходимо отметить, что в приполярных регионах глобальные океанические модели не являются точными вследствие ограниченного покрытия спутниковой альтиметрией (например, для проекта TOPEX/POSEIDON оно составляет $\pm 66^\circ$). Многие исследователи привлекают в этом случае реальные местные данные с мареографов и измерителей придонного давления. Ранее для проверки различных океанических приливных моделей вокруг Антарктиды применялись данные мареографов, гравиметров и GPS (King, Padman, 2005). Для ледовых шельфовых зон был установлен низкий уровень точности моделей CSR3.0 (Eanes, 2002) и NAO.99b (Matsumoto et al., 2000), и обнаружено, что для Антарктики оптимальной является модель TPXO6.2 (Egbert, Egofoeva, 2002). В то же время, в работах (Kobayashi et al., 2004) и (Iwano et al., 2005) было показано, что оптимальной моделью для данного региона является NAO.99b. Однако в перечисленных работах было получено достаточно большое расхождение теории с наблюдениями (0,26 %) по волне M2 для станции Syowa и (-0,10 %) для среднеширотных станций, например Страсбурга.

В цитируемой здесь работе (Kim et al., 2011) также проверялась эффективность добавления к глобальным океаническим приливным моделям данных с мареографов и данных по придонному давлению. Устанавливались различия по фазе и амплитуде волн. Было отмечено, что учет региональных особенностей по измерениям мареографов и измерениям придонного давления снижает отклонения от наблюдений на 5 %. В частности, были применены записи мареографов продолжительностью 30 месяцев (17.05.2005—30.11.2007) и записи придонного давления за 14 месяцев (15.12.2005—17.02.2007). Формальные ошибки приливного анализа для записей мареографов и придонного давления составляют обычно 0,2 и 0,5 % соответственно. Наилучшей моделью, по данным мареографов, является модель NAO.99b ($\sigma = 1,28$ см

по сумме волн). В то же время по данным о придонном давлении модели FES2004 ($\sigma = 1,41$ см) и TPXO7.2 ($\sigma = 1,47$ см) имеют меньшие ошибки нежели NAO.99b ($\sigma = 1,96$ см). Это, по мнению авторов, говорит о том, что FES2004 и TPXO7.2 больше подходят для глубокого открытого моря, нежели для мелководья. Рассмотрение данных местных мареографических наблюдений оказалось более эффективным для суточных волн. Так, уменьшение разностей наблюдаемых и теоретических кривых в суточной полосе при применении океанической модели TPXO7.2 составляет 29 %. Однако для полусуточных волн оно составило лишь 11 %. Подобная тенденция наблюдалась и для модели FES2004.

Помимо океанического эффекта в районе станции Suowa имеют место и другие локальные специфические эффекты. Например, в работе (Doi et al., 2010) оценено влияние на данные измерений сверхпроводящим гравиметром колебаний массы ледяного антарктического щита. Этот эффект составил порядка 4,8 мкГал за четыре года. Району присущи также специфические атмосферные эффекты, связанные с солнечной радиацией. Так, в работе (Boy et al., 1998) этим эффектам приписывают до 29 % разностей между локально и глобально скорректированным гравиметрическим δ -фактором для волны S1.

Ранее, в работах (Спиридонов, Виноградова; 2013, 2014) обсуждаемые выше данные гравиметрических наблюдений на станции Suowa были проанализированы для трех океанических моделей: CSR3.0, FES95.2 и SCW80. В итоге было установлено, что в целом ближе к наблюдаемым на этой станции значениям океанического эффекта оказались результаты, полученные по нагрузочным дельта-факторам, рассчитанным с учетом диссипации по модели строения Земли IASP91. Все рассчитанные нами значения лучше соответствовали данным наблюдений, нежели полученные при помощи известной программы LOAD89 из пакета ETERNA. Тем не менее наши результаты оказывались систематически дальше от наблюдений, чем значения, полученные по моделям из (Kim et al., 2011). Эти отличия для амплитуд полусуточных и суточных волн составили в относительной мере 10–75 %. Для четырех (O1, P1, Q1 и N2) из восьми исследуемых волн расхождения с экспериментом определялись в основном неточностью вычислений фазы. Однако для оставшихся четырех волн (M2, K1, K2 и S2) требовалось уточнение как фазы, так и амплитуды. К аналогичным выводам для станции Suowa мы пришли и в случае сравнения наших результатов с данными работы (Boy et al., 2003).

Основной целью настоящей работы являлось сравнение описанных выше данных наблюдений на станции Suowa с теоретическими расчетами, проведенными при помощи новой и единственной отечественной программы прогноза земных приливов ATLANTIDA3.1_2014. Подробное описание программы и теоретических выводов, положенных в основу ее разработки, дано в (Спиридонов, 2014).

Среди основных возможностей программы следует выделить следующие:

- 1) расчет амплитуд и фаз океанического гравиметрического эффекта с учетом диссипации по шести океаническим приливным моделям (SCW80, CSR3, CSR4, FES95.2, FES2012 и NAO99b);

- 2) расчет амплитудных дельта-факторов для Земли без океана, а также прогнозных амплитудных факторов и сдвигов фаз для Земли с океаном. Дельта-факторы для Земли без океана, а также нагрузочные дельта-факторы суточных и полусуточных приливных волн и их зависимость от широты рассчитываются согласно работе

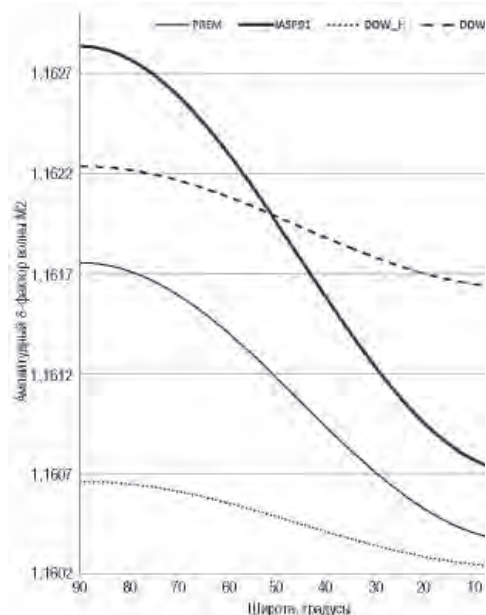


Рис. 1. Зависимости амплитудного дельта-фактора волны M2 от широты, рассчитанные в работе (Spiridonov, 2014) для моделей строения Земли PREM и IASP91, а также полученные в работе (Dehant et al., 1999) (модели DDW/H и DDW/NH).

(Spiridonov, 2014). Для остальных групп волн в данной версии программы приняты средние значения дельта-факторов из работы (Dehant et al., 1999) для модели DDW/NH. О степени различия широтных распределений дельта-факторов указанных двух моделей можно судить, в частности, по рис.1, на котором приведены соответствующие кривые для волны M2. Из рисунка видно, что наибольшие различия между нашей моделью и моделями DDW наблюдаются вблизи экватора и полюса;

3) получение временных рядов приливов. Этот расчет проводит программа PRILET, разработанная Э.А. Боярским и Л.В. Афанасьевой (Spiridonov et al., 2015). Схема вычислений здесь в основном следует программе PREDICT из пакета Венцеля ETERNA 3.3 (Wenzel, 1996). Применяется разложение приливного потенциала на 1200 волн Тамуры (1987).

К дополнительным возможностям следует отнести возможности расчета амплитуд и фаз океанического гравиметрического эффекта в узлах сетки, а также расчет горизонтальных составляющих океанического эффекта. Все вычисления можно производить по двум моделям строения Земли (PREM и IASP91).

Для более детального знакомства с программой ее можно скачать, пройдя по ссылке: <https://yadi.sk/d/hszRKInqcrDSC>.

Скачиваемый файл ATLANTIDA.EXE представляет собой самораспаковывающийся архив, содержащий все необходимые элементы программы. Программа устанавливается в корень любого диска.

В первом разделе настоящей работы мы проводим сравнение теоретических и наблюдаемых значений океанического гравиметрического эффекта. Под наблюдаемыми здесь понимаются значения амплитуд и фаз приливных волн, полученные путем вычитания из данных наблюдений теоретического приливного сигнала для упругой

Земли без океана. Второй раздел посвящен сравнительному анализу наблюдаемых и прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз приливных волн для Земли с океаном, а также теоретических амплитудных дельта-факторов для Земли без океана.

СРАВНЕНИЕ РАССЧИТАННОГО И НАБЛЮДАЕМОГО ОКЕАНИЧЕСКОГО ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Амплитуды и фазы наблюдаемого на станции Suowa океанического эффекта представлены в табл. 1. После списка анализируемых волн (первый столбец) в остальных трех парных столбцах последовательно показаны значения амплитуд (в микрогаллах) и фаз (в градусах) наблюдаемого океанического эффекта, вычисленные по наблюдаемым амплитудам и фазам приливных волн при помощи нашей программы ATLANTIDA3.1_2014, а также полученные в работах работы (Kim et al., 2011) и (Boy et al., 2003).

Таблица 1

Наблюдаемый океанический эффект на станции Suowa

Волны	ATLANTIDA3.1_2014		Kim et al., 2011		Boy et al., 2003	
	Амплитуда, мкГал	Фаза, градусы	Амплитуда, мкГал	Фаза, градусы	Амплитуда, мкГал	Фаза, градусы
Q1	0,610	18,42	0,612	18,35	0,604	21,18
O1	2,445	9,02	2,459	9,01	2,428	9,25
P1	0,650	3,63	0,659	3,64	0,633	2,91
K1	1,939	3,81	1,995	3,67	1,920	3,56
N2	0,493	8,49	0,493	8,47	0,484	9,91
M2	2,321	5,08	2,325	5,06	2,310	5,13
S2	1,526	-4,78	1,528	-4,76	1,520	355,02
K2	0,443	-2,78	0,443	-2,77	0,446	356,45

Видно, что значения столбца ATLANTIDA3.1_2014 ближе к соответствующим значениям из работы (Kim et al., 2011). Это связано с тем, что для вычислений наблюдаемого океанического эффекта нами были приняты амплитуды и фазы волн суммарного наблюдаемого прилива именно из работы (Kim et al., 2011), в которой анализируется более длинный ряд наблюдений. Полученные различия при этом связаны с различными значениями принятых в расчетах величин амплитудных дельта-факторов для Земли без океана. Из табл. 2 видно, что принятые в настоящей работе значения амплитудных дельта-факторов (Spiridonov, 2014) несколько выше используемых в работе (Kim et al., 2011) значений из модели DDW/NH. Как следует из рассмотрения последних двух столбцов этой таблицы, наибольшие различия здесь наблюдаются для волн K1 (0,17 %) и P1 (0,09 %). Несколько большее отличие наших значений наблюдаемого океанического эффекта от значений из работы (Boy et al., 2003) (табл. 1) очевидно объясняется тем, что, несмотря на применение в этой работе модели DDW/NH, анализу был подвергнут гораздо более короткий ряд наблюдений. Помимо этого, в двух цитируемых работах применены разные программы приливного анализа. В дальнейшем изложении мы будем применять значения из первого парного столбца табл. 1 (ATLANTIDA3.1_2014).

Амплитудные дельта-факторы для Земли без океана и их разность (Syowa)

Волны	ATLANTIDA3.1_2014	DDW/NH	Разность	Разность, %
Q1	1,15509	1,15442	0,00067	$5,80 \cdot 10^{-2}$
O1	1,15508	1,15439	0,00069	$5,97 \cdot 10^{-2}$
P1	1,14999	1,14896	0,00103	$8,96 \cdot 10^{-2}$
K1	1,13572	1,13381	0,00191	$1,68 \cdot 10^{-2}$
N2	1,16257	1,16216	0,00041	$3,53 \cdot 10^{-2}$
M2	1,16257	1,16216	0,00041	$3,53 \cdot 10^{-2}$
S2	1,16257	1,16216	0,00041	$3,53 \cdot 10^{-2}$
K2	1,16257	1,16216	0,00041	$3,53 \cdot 10^{-2}$

Следует отметить, что относительный вклад океанического эффекта в суммарную наблюдаемую амплитуду прилива у суточных волн в разы меньше, чем у полусуточных. Это очевидно является следствием относительной малости амплитуд объемного прилива полусуточных волн в высоких широтах. Так, амплитуды океанического эффекта составляют для суточных волн от 5,5 % (K1, P1) до 9,2 % (O1) и 11,8 % (Q1) от суммарных наблюдаемых амплитуд. Для полусуточных волн эти отношения меняются от 17,1 % (M2) до 23,7 % (K2). Из этого непосредственно следует, что неопределенности вычисляемых в дальнейшем по данным наблюдений дельта-факторов для Земли без океана и прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз очевидно выше для полусуточных, нежели суточных волн.

Рассмотрим теперь вопрос о степени близости наблюдаемого и предвычисленного по различным океаническим приливным моделям океанического эффекта. Для этого рассмотрим диаграммы, представленные на рис. 2 цвет. вклейки.

На рисунке приведено 8 диаграмм — по одной для каждой из анализируемых волн. Название волны подписано в правом углу каждой диаграммы. По осям абсцисс даны шкалы для косинусных (синфазные) составляющих разностей (прогноз минус наблюдения), а по осям ординат — для синусных (аутофазных) составляющих в микрогаллах. Наблюдаемые значения океанического эффекта для каждой из волн отнесены к началу координат. Каждой цветной точке на диаграммах соответствует одна из 14 анализируемых океанических моделей. Удаление точки от начала координат характеризует амплитуду разностного вектора. В расположенной под рисунком легенде показано, какой цвет точки соответствует какой океанической модели. После названия модели следует постфикс, указывающий на авторство расчета, произведенного по каждой из моделей (_KIM — (Kim et al., 2011); _BOY — (Boy et al., 2003); _ATL — ATLANTIDA3.1).

Из сравнения различных вариантов расчетов океанического эффекта по модели CSR4.0 следует, что для всех волн результаты наших вычислений (_ATL) по этой модели ближе к наблюдениям, нежели результаты (Kim et al., 2011). Правда, разности по полусуточным волнам можно считать практически одинаковыми. В то же время наша модель несколько уступает расчетам в (Boy et al., 2003) по трем полусуточным волнам: M2, S2 и K2. Хотя и здесь разности по M2 и K2 практически сопоставимы.

Результаты GOT99.2_BOY в целом дальше от наблюдений, чем результаты GOT99.2b_KIM. Исключение составляют волны Q1 и N2. Амплитуды разностных векторов по трем вариантам NAO99b практически одинаковы. Исключение состав-

ляют волны M2 и S2, для которых данные нашей модели NAO99b_ATL находятся все же дальше от наблюдений.

Из сравнения различных вариантов моделей FES следует, что данные FES99b_BOY ближе к наблюдениям, нежели данные двух других моделей для волн K1, M2, S2, K2, сопоставимы с моделью FES2004_KIM для волн P1 и уступают этой модели по волнам Q1, O1 и N2. Модель FES2012_ATL в целом дальше от наблюдений, нежели предыдущие две модели и сопоставима с ними для Q1, N2, K2. Интересно, что амплитуда эффекта, полученная по моделям FES, падает с увеличением года выпуска модели. Исключение составляет волна K2.

Наименьший разброс значений амплитуд разностных векторов по всем рассматриваемым океаническим моделям характерен для волн K2 и N2. В то же время этим волнам соответствуют наименьшие амплитуды океанического эффекта.

В целом разброс значений амплитуд и фаз океанических моделей на станции Suowa достаточно велик, поэтому получение точных оценок прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз для Земли с океаном здесь весьма затруднительно. Тем не менее с точки зрения применимости того или иного набора теоретических дельта-факторов для упругой Земли без океана можно выделить и нечто общее для всех океанических моделей. При этом неважно, насколько хорошо совпадает данная модель с наблюдениями. Напомним, что наблюдаемый океанический эффект вычислялся исходя из амплитудных факторов, принятых в настоящей работе.

Так же нами вычислялись амплитуды и фазы разностных векторов, т.е. из вектора наблюдаемого океанического эффекта вычитался теоретически предсказанный вектор. Амплитуды этих векторов характеризуют степень близости каждой из рассматриваемых океанических моделей к наблюдениям и характеризуются расстояниями от точек до начала координат на рис. 2 цвет. вклейки. Если взять для расчета разностей наблюдаемый океанический эффект из работы (Kim et al., 2011), вычисленный на основе модели DDW/NH, то окажется, что полученные в итоге амплитуды разностных векторов в 70,5 % случаев (по 14 станциям и 8 волнам) превысят соответствующие амплитуды, показанные на рис. 2 цвет вклейки. Т.е. вне зависимости от выбора океанической модели амплитуды разностных векторов, полученных в настоящей работе, оказываются меньше, чем полученные в работе (Kim et al., 2011) по амплитудным факторам из DDW/NH. Таким образом, применение для расчета наблюдаемого океанического эффекта на станции Suowa теоретических дельта-факторов модели DDW/NH почти в 70 % случаев приводит к очевидно худшим результатам в отношении близости достаточно большого числа океанических моделей к наблюдениям, нежели применение амплитудных факторов из работы (Spiridonov, 2014).

Из представленных на рис. 2 цвет. вклейки данных следует, что ближе всего к наблюдениям оказалась глобальная модель TPXO7.2_KIM. Ей немного уступают две другие модели TPXO, а также FES2004_KIM. Также достаточно близки к наблюдениям модели NAO99_BOY и FES99_BOY. Среди наших моделей в среднем по волнам лучше смотрится NAO99b_ATL. FES2012_ATL и CSR4.0 почти в полтора раза дальше от наблюдаемых значений.

В то же время авторы работы (Kim et al., 2011) отмечают близость своих моделей TPXO7.2, FES2004 и NAO99b к результатам наблюдений мареографов и данным о придонном давлении.

В связи с этим в ходе дальнейшего сравнительного анализа прогнозных значений дельта-факторов и сдвигов фаз мы остановимся в основном на четырех океанических моделях из работы (Kim et al., 2011) (TPXO7.2 и 7.1, NAO99b, FES2004), а также наших результатах, полученных по моделям NAO99b, FES2012 и CSR4.0.

ПРОГНОЗНЫЕ ДЕЛЬТА-ФАКТОРЫ И СДВИГИ ФАЗ

Прежде всего отметим, что, несмотря на достаточно большую удаленность наших расчетных значений океанического эффекта на станции Syowa, полученных при помощи трех океанических моделей NAO99b, FES2012 и CSR4.0, от наблюдаемых, они тем не менее приводят к лучшим результатам при расчете прогнозных дельта-факторов для Земли с океаном по сравнению с широко распространенными в настоящее время вычислениями по программам PREDICT, MT80w и T-soft, производимыми по среднему из 6 и 9 океанических моделей. Поскольку значения прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз, получаемые при помощи трех указанных программ для станции Syowa, практически идентичны, то для сравнения мы возьмем значения, полученные по программе PREDICT. Результаты сравнения представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Наблюдаемые и прогнозные значения дельта-факторов и сдвигов фаз								
Волны	Наблюдения		PREDICT 9		PREDICT 6		FES2012_ATL	
	δ	Фаза, градусы	δ	Фаза, градусы	δ	Фаза, градусы	δ	Фаза, градусы
Q1	1,301	2,13	1,265	1,83	1,269	1,84	1,292	2,09
O1	1,271	0,83	1,253	1,07	1,254	1,05	1,259	0,78
P1	1,217	0,20	1,203	0,26	1,203	0,34	1,207	0,15
K1	1,202	0,21	1,185	0,29	1,186	0,32	1,189	0,24
N2	1,427	1,58	1,369	1,86	1,371	1,82	1,400	1,52
M2	1,402	0,87	1,346	0,32	1,352	0,40	1,371	0,74
S2	1,502	-1,08	1,413	-0,43	1,426	-0,60	1,449	-2,83
K2	1,525	-0,66	1,425	0,82	1,436	0,40	1,477	-1,72
Волны	Наблюдения		NAO99b_ATL		CSR4.0_ATL		Среднее по трем	
	δ	Фаза, градусы	δ	Фаза, градусы	δ	Фаза, градусы	δ	Фаза, градусы
Q1	1,301	2,13	1,290	2,10	1,286	2,74	1,289	2,31
O1	1,271	0,83	1,267	0,94	1,274	1,81	1,267	1,18
P1	1,217	0,20	1,214	0,28	1,216	0,72	1,212	0,38
K1	1,202	0,21	1,199	0,34	1,197	0,70	1,195	0,43
N2	1,427	1,58	1,387	2,09	1,409	2,66	1,398	2,09
M2	1,402	0,87	1,374	1,20	1,390	0,29	1,378	0,74
S2	1,502	-1,08	1,473	-0,26	1,475	-0,78	1,466	-1,29
K2	1,525	-0,66	1,496	1,16	1,488	-0,65	1,487	-0,40

В первом столбце табл. 3 приведен список рассматриваемых восьми волн, во втором парном столбце даны значения наблюдаемых на станции Syowa амплитудных факторов и сдвигов фаз для Земли с океаном. Далее следуют значения прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз, рассчитанные программой PREDICT при осреднении по 9 и 6 океаническим моделям, а также полученные по программе ATLANTIDA3.1 по трем океаническим моделям (FES2012, NAO99b и CSR4.0). Столбец «Среднее по трем» содержит средние по этим последним трем моделям.

В табл. 4 представлены амплитуды разностных векторов прогнозных дельта-факторов и их среднее по волнам. Они получены путем вычитания наблюдаемых векторов из теоретических. Названия столбцов те же, что и в табл. 3.

Амплитуды разностных векторов прогнозных дельта-факторов

Волны	PREDICT 9	PREDICT 6	FES2012	NAO99b	CSR4.0	MEAN3
Q1	$3,66 \cdot 10^{-2}$	$3,31 \cdot 10^{-2}$	$9,55 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$
O1	$1,86 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$4,64 \cdot 10^{-3}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$8,88 \cdot 10^{-3}$
P1	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$9,86 \cdot 10^{-3}$	$3,59 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$5,95 \cdot 10^{-3}$
K1	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$4,30 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$8,29 \cdot 10^{-3}$
N2	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$5,62 \cdot 10^{-2}$	$2,72 \cdot 10^{-2}$	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$3,23 \cdot 10^{-2}$	$3,11 \cdot 10^{-2}$
M2	$5,78 \cdot 10^{-2}$	$5,11 \cdot 10^{-2}$	$3,16 \cdot 10^{-2}$	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$
S2	$8,97 \cdot 10^{-2}$	$7,65 \cdot 10^{-2}$	$6,89 \cdot 10^{-2}$	$3,59 \cdot 10^{-2}$	$2,75 \cdot 10^{-2}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$
K2	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$9,35 \cdot 10^{-2}$	$5,51 \cdot 10^{-2}$	$5,62 \cdot 10^{-2}$	$3,73 \cdot 10^{-2}$	$3,87 \cdot 10^{-2}$
Среднее	$4,98 \cdot 10^{-2}$	$4,48 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$

Из табл. 3 видно, что все без исключения прогнозные дельта-факторы для наших моделей ближе к наблюдаемым, чем рассчитанные программой PREDICT. Наилучшие результаты в этом смысле соответствуют в основном модели CSR4.0 (за исключением волны Q1, по которой первое место занимает FES2012). Модели FES2012 также в основном соответствуют и наименьшие фазовые разности. Исключение здесь составляют волны S2 и K2. В то же время фазовые сдвиги, рассчитанные по нашим трем моделям, лежат дальше от их наблюдаемых значений, нежели рассчитанные программой PREDICT. В связи с этим был предпринят анализ амплитуд разностных векторов (табл. 4), который с несколько большей очевидностью демонстрирует преимущества наших расчетов.

Из сравнения приведенных в табл. 4 средних по волнам значений (строка «Среднее») следует, что лучше всего наблюдениям соответствует среднее по трем нашим океаническим моделям («Среднее по трем»). Несколько дальше от наблюдений лежат результаты, полученные по океаническим моделям CSR4.0 и NAO99b. На последнем месте находится FES2012. Амплитуды разностных векторов по суточным волнам в целом меньше у модели NAO99b, а по полусуточным — у CSR4.0. Как правило, отклонения прогнозных факторов от наблюдаемых лежат в пределах первых единиц во втором знаке после запятой. Подобные различия, безусловно, достаточно велики.

Посмотрим теперь на значения дельта-факторов, полученные с применением океанических моделей, наиболее близких как к наблюдаемому океаническому эффекту, так и данным мареографических наблюдений.

В табл. 5 представлены результаты вычислений амплитудных дельта-факторов для Земли без океана. Приведенные значения получены путем вычитания из результатов наблюдений данных океанических моделей FES2004, TPXO7.1 и TPXO7.2 (Kim et al., 2011). В последних четырех столбцах таблицы приведены средние значения указанных дельта-факторов по трем указанным океаническим моделям («Среднее»), среднеквадратические отклонения от этих средних (σ), а также разности между средними по трем моделям и теоретическими значениями амплитудных факторов, полученными в работах (Spiridonov, 2014) («Разность ATL») и (Dehant et al., 1999) («Разность DDW»).

Из табл. 5 видно, что в целом лучше совпадают с теорией значения амплитудных факторов для суточных волн, а также волны M2. Это же следует из рассмотрения рассчитанных фазовых сдвигов (значения здесь не показаны). В то же время для шести из восьми волн (т.е. в 75 % случаев) значения средних по трем океаническим моделям дельта-факторов лежат дальше от теоретических значений DDW/NH, нежели

Амплитудные дельта-факторы для Земли без океана (Syowa)

Волны	FES2004	TPXO7.1	TPXO7.2	Среднее	σ	Разность ATL	Разность DDW
Q1	1,1577	1,1638	1,1638	1,1618	0,002906	6,68·10⁻³	7,35·10⁻³
O1	1,1509	1,1591	1,1581	1,1560	0,004125	9,53·10⁻⁴	1,64·10⁻³
P1	1,1526	1,1506	1,1522	1,1518	0,001907	1,81·10⁻³	2,84·10⁻³
K1	1,1380	1,1393	1,1364	1,1379	0,001835	2,18·10⁻³	4,09·10⁻³
N2	1,1923	1,1743	1,1707	1,1791	0,010147	1,65·10⁻²	1,69·10⁻²
M2	1,1625	1,1635	1,1653	1,1638	0,00129	1,20·10⁻³	1,61·10⁻³
S2	1,1391	1,1559	1,1565	1,1505	0,008489	-1,21·10⁻²	-1,17·10⁻²
K2	1,1402	1,1462	1,1536	1,1467	0,005846	-1,59·10⁻²	-1,55·10⁻²

от значений, рассчитанных по модели из работы (Spiridonov, 2014). Это, в частности, следует и из анализа разностей, приведенных в столбцах «Разность ATL» и «Разность DDW». Исключение здесь составляют волны S2 и K2, для которых разности, полученные по модели DDW, несколько меньше.

Отклонения рассчитанных дельта-факторов от теоретических лежат в пределах единиц в третьем знаке после запятой для волн O1, P1, K1 и M2. Почти на порядок больше эти разности для N2, S2 и K2. Волна Q1 в данном случае занимает промежуточное положение.

В целом необходимо отметить, что показанные в табл. 5 разности вряд ли можно считать удовлетворительными при обработке результатов измерений, полученных на высокоточном сверхпроводящем гравиметре. К нескольким лучшим результатам можно прийти после учета в модели TPXO7.2 данных местных измерений (мареографы и придонное давление) (Kim et al., 2011).

По данным, приведенным в работе (Kim et al., 2011), нам удалось вычислить поправки к модели TPXO7.2, учитывающие локальные измерения, и определить значения дельта-факторов и сдвигов фаз для Земли без океана. Результаты этих вычислений сведены в табл. 6. После списка волн в этой таблице приведены значения вычисленных дельта-факторов и сдвигов фаз. Последние два столбца содержат разности вычисленных и теоретических значений дельта-факторов. Столбец «Разность ATL» соответствует нашей модели, а «Разность DDW/NH» модели DDW/NH.

Таблица 6

Амплитудные дельта-факторы для Земли без океана, Syowa.
Океаническая модель TPXO7.2 совместно с измерениями мареографов
и данными о придонном давлении

Волны	δ	Фаза, градусы	Разность ATL	Разность DDW
Q1	1,1622	-0,17	7,12·10 ⁻³	7,79·10 ⁻³
O1	1,1578	-0,06	2,72·10 ⁻³	3,41·10 ⁻³
P1	1,1518	0,19	1,77·10 ⁻³	2,80·10 ⁻³
K1	1,1357	-0,03	-5,33·10 ⁻⁵	1,86·10 ⁻³
N2	1,1670	0,10	4,48·10 ⁻³	4,89·10 ⁻³
M2	1,1649	-0,66	2,32·10 ⁻³	2,73·10 ⁻³
S2	1,1570	-0,45	-5,53·10 ⁻³	-5,12·10 ⁻³
K2	1,1543	-1,38	-8,32·10 ⁻³	-7,91·10 ⁻³

За исключением волн Q1 и O1 значения дельта-факторов из табл. 6 оказались ближе к теоретическим значениям, по сравнению с их значениями из табл. 5. В особенности это относится к волнам N2, S2, K2. В то же время для волн P1, K1, M2 улучшение нельзя назвать принципиальным. Для пяти волн из восьми также стали ближе к нулю значения фаз. Исключение здесь составили волны Q1, M2 и S2. В целом вследствие неопределенности океанической нагрузки на станции Syowa пока не представляется возможным определить амплитудные дельта-факторы основных приливных волн точнее первых единиц в третьем знаке после запятой, а фазы — точнее первых десятых долей градуса.

В то же время из табл. 6, как и табл. 5, следует, что для шести волн из восьми полученные значения наблюдаемых дельта-факторов ближе к нашим теоретическим значениям, а не значениям DDW/NH.

ВЫВОДЫ

Из проведенного сравнения теоретических и наблюдаемых результатов по станции Syowa можно сделать следующие выводы:

1. Океанический гравиметрический эффект на станции Syowa, вычисленный для различных океанических приливных моделей и приливных волн по амплитудным дельта-факторам из работы (Spiridonov, 2014), более чем в 70 % случаев ближе к наблюдаемому, нежели полученный по дельта-факторам модели DDW/NH (Dehant et al., 1999).

2. Также в целом оказались ближе к наблюдениям теоретические значения дельта-факторов для Земли без океана и прогнозные амплитудные факторы и сдвиги фаз для Земли с океаном, рассчитанные по нашей модели, нежели полученные по DDW/NH.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Спиридонов Е.А., Виноградова О.Н.* Гравиметрический океанический нагрузочный эффект. Lamdert Acad. Publishing, 2013. 148 с.
- Спиридонов Е.А., Виноградова О.Ю.* Сравнение результатов расчета океанического гравиметрического эффекта с данными наблюдений // Физика Земли. 2014. № 1. С.120–128.
- Спиридонов Е.А.* Программа анализа данных земноприливных наблюдений ATLANTIDA3.1_2014// Научно-технические разработки. 2014. Т. 93. № 3. С. 3–48.
- Anderson D.I., Given J.W.* Absorbtion band Q model for the Earth // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. P. 3893–3904.
- Boy J.P., Hinderer J., Gegout P.* Global atmospheric loading and gravity // Phys. Earth Planet. Inter. 1998. Vol. 109. P. 161–177.
- Boy J.P., Llubes M., Hinderer J., Florsch N.* A comparison of tidal ocean loading models using superconducting gravimeter data // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108 (B4). P. 235–249.
- Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M.* Tides for a convective Earth // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 1035–1058.
- Doi K., Shibuya K., Aoyama Y., Ikeda H., Fukuda Y.* Observed gravity change at Syowa Station induced by Antarctic ice sheet mass change // Gravity, Geoid and Earth Observations. IAG Symposia, Chania, Crete, Greece, 23–27 June 2008 / Ed. S.P. Mertirfs. Springer, 2010. P. 557–562.
- Eanes R.* The CSR4.0 global ocean tide model. 2002. URL: <ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/tide/> [дата обращения 19.08.2015].
- Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* Efficient invers modelling of barotropic ocean tides // J. Atmos. Oceanic. Technol. 2002. Vol. 19 (2). P. 183–204.

- Iwano S., Fukuda Y., Sato T., Tamura Y., Matsumoto K., Shibuya K.* Long-period tidal factors at Antarctica Syowa Station determined from 10 years of superconducting gravimeter data // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, B10403. doi:10.1029/2004JB03551.
- Kim T-H., Shibuya K., Doi K., Aoyama Y., Hayakawa H.* Validation of global ocean tide models using the superconducting gravimeter data at Syowa Station, Antarctica, and in situ tide gauge and bottom-pressure observations // Elsevier. *Polar Science*. 2011. Vol. 5. P. 21–39.
- King M.A., Padman L.* Accuracy assessment of ocean tide models around Antarctica // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. L23608.
- Kobayashi Y., Iwano S., Fukuda Y.* Detailed coastline data around Syowa Station, Antarctica, and calculation of the oceanic tidal loading effects // *J. Geod. Soc. Jpn.* 2004. Vol. 50. P. 17–26.
- Matsumoto K., Takanezawa T., Ooe M.* Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/Poseidon altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan // *Oceanogr.* 2000. Vol. 56. P. 567–581.
- Matsumoto K., Sato T., Takanezawa T., Ooe M.* GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect // *J. Geod. Soc. Jpn.* 2001. Vol. 47. P. 243–248.
- Okubo S., Tsuji D.* Complex Green's function for diurnal/semidiurnal loading problems // *J. Geod. Soc. Jpn.* 2001. Vol. 47. P. 225–230.
- Spiridonov E.* Tidal-Amplitude Delta-Factors and Their Dependence on Latitude // *Geophysical Research Abstracts*. 2014. Vol. 16. EGU2014-1296.
- Spiridonov E., Vinogradova O., Boyarskiy E., Afanasyeva L.* ATLANTIDA3.1_2014 for Windows: a software for tidal prediction // *Bull. Inf. Marées Terrestres*, Feb. 2015. № 149. 12062–12081.
- Tamura Y., Sato T., Ooe M., Ishiguro M.* A procedure for Tidal Analysis with a Bayesian Information Criterion // *Geophys. J. Int.* 1991. Vol. 104. P. 507–516.
- Wenzel H.G.* The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package Eterna3.30 // *Bull. D'Inf. Maree Terr.* 1996. Vol. 124. P. 9425–9439.

E.A. SPIRIDONOV, O.YU. VINOGRADOVA

THE ANALYSIS OF THE EARTH TIDE OBSERVATIONS ON JAPANESE ANTARCTIC STATION SYOWA

During testing of the new native program of tidal prediction ATLANTIDA3.1_2014 the data of gravimetric observations on the Japanese Antarctic station Syowa (Kim et al., 2011) were subjected to substantial additional processing. First of all, these data are interesting due to the rather high latitude of the site location (69°.007 S). This allowed, in particular, to compare with greater reliability two latitudinal distribution of gravimetric amplitude delta-factors: resulting in the construction of a well-known model DDW/NH (Dehant V. et. al., 1999) and calculated in the work (Spiridonov E.A., 2014). At the same time, the stable and accurate superconducting gravimeter located at the station is set just 250 meters from the shoreline, i.e. largely influenced by ocean. In this regard, the interest is also represented in the performance testing in Antarctic of modern oceanic tidal models (in particular, FES2012).

As a result of the analysis it was found that the best oceanic tidal model in the Antarctic zone is TPX07.2. This coincides with the results of work (Kim et al., 2011). However, in general, the range of results obtained by different ocean models proved to be quite large. Nevertheless, it was shown that at high latitudes, regardless of the choice of oceanic tidal model, application of the theoretical amplitude delta- factors for the Earth without the ocean from DDW /NH model in more than 70 % leads to a more distant from the observation results than the use of amplitude factors of our model.

Keywords: oceanic loading effect, tidal amplitude delta-factors.



Рис. 2. Фазовые диаграммы разностей векторов: прогноз океанического эффекта минус наблюдения для 8 волн и 14 океанических моделей. Антарктическая станция Syowa.