

УДК 656.212.5: 581.3

И.И. Гладких, д.т.н., проф.

Б.Б. Капочкин, к.геол.н.

В.Ю. Зорин

Научно-исследовательский центр Вооруженных Сил Украины «Государственный океанариум», г. Одесса, Украина

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУППИРОВКИ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ

Выполнены расчеты поправок для уточнения орбитальных характеристик спутниковых группировок укомплектованных альтиметрами. Повышение точности измерений топографии морской поверхности приводит к повышению точности расчета морских течений, что в свою очередь повышает эффективность проведения морских поисково-спасательных работ.

Ключевые слова: *альтиметр, орбитальная ошибка, динамическая топография, проливы, поисково-спасательные работы.*

Постановка проблемы

Определение топографии поверхности Мирового океана с использованием спутниковой альтиметрии выполняется с использованием радиолокационных методов. Процесс измерений, выполняемых в оперативном режиме, включает измерение высоты спутника над морской поверхностью относительно прогнозируемой высоты орбиты спутника. К погрешностям измерений относят влияние атмосферы на прохождение радиосигнала, наличие волн на морской поверхности, приводящих к изменению формы отраженного сигнала, влияние поля атмосферного давления инструментальные, неопределенность формы геоида, ошибки измерительного комплекса.

Спутниковые группировки, укомплектованные альтиметрами запущены на квазикруговые орбиты с орбитальным расстоянием от 600 до 1500 км [4]. Для получения оперативной информации о топографии морской поверхности каждые 6-8 часов осуществляется оперативный прогноз высоты орбиты спутника. Структура базы данных спутниковой альтиметрии включает модели геоцентрического определения координат и ошибки их определения.

Окончательный вариант данных об орбитальных характеристиках спутника формируется спустя 1-2 месяца после измерения. Уточнение орбитальных характеристик выполняется по данным вектора положения спутника, полученного с наземных лазерных станций слежения. Непосредственно во время выполнения измерений орбитальная ошибка достигает 20-30 см, что не позволяет использовать опереточные данные для получения достоверной информации. В результате введения поправок, через 1-2 месяца орбитальная ошибка снижается до 2,5 см. На рис. 1 приведены данные о точности орбитальных характеристик альтиметров, установленных на разных спутниках.

Уточненные данные, к сожалению, не имеют оперативной ценности.

На рис. 2 приведены треки различных спутников в Азово-Черноморском регионе.

Влияние точности определения орбитальных характеристик спутников на определение наклона уровня с проливе может быть абсолютной и относительной. При определении наклона морской поверхности в проливе путем анализа данных разных спутников, запущенных в соответствии с различными программами, с отличающимися орбитами, целесообразно проводить, опираясь на величину абсолютной погрешности. При интерпретации данных одного спутника и того же спутника, но полученных на разных витках, также целесообразно проводить, опираясь на величину абсолютной погрешности. Только в случае интерпретации данных измерений топографии морской

поверхности полученных во время измерений на одном витке спутника, можно оперировать относительными погрешностями и получать достаточно точные сравнения изменения уровня с обеих сторон пролива. Пример таких измерений показан на рис. 3 [4].

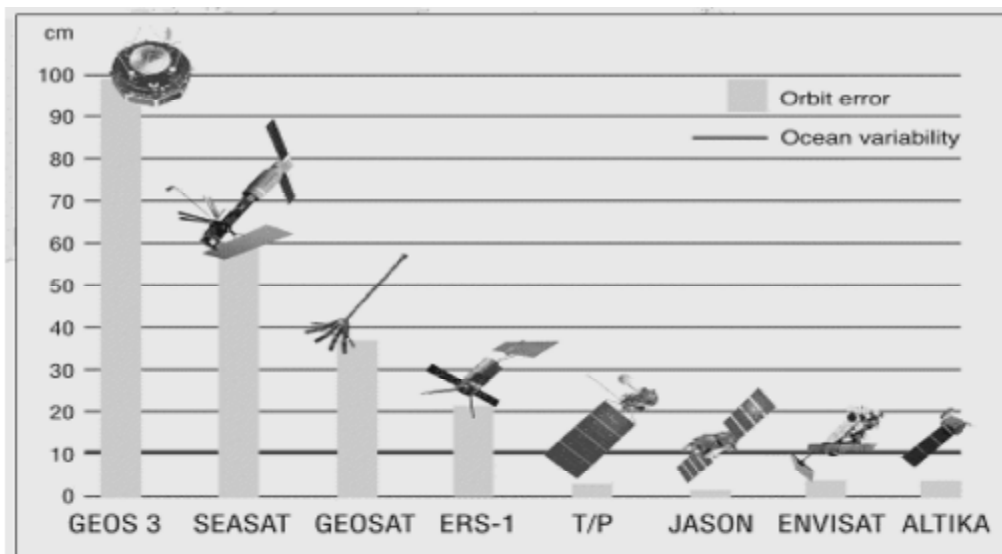
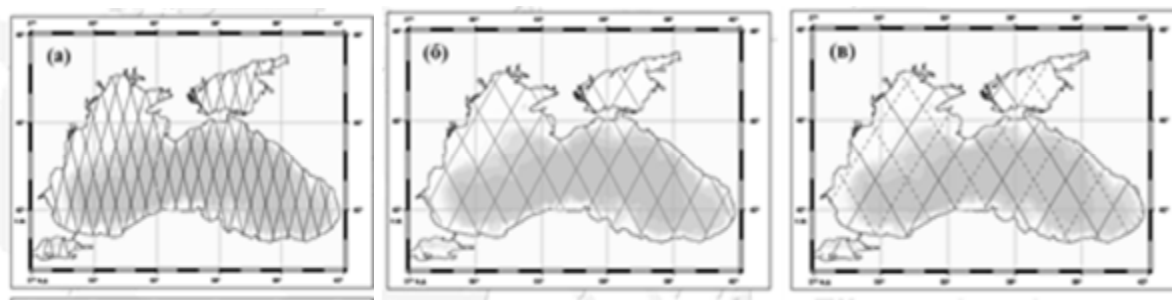
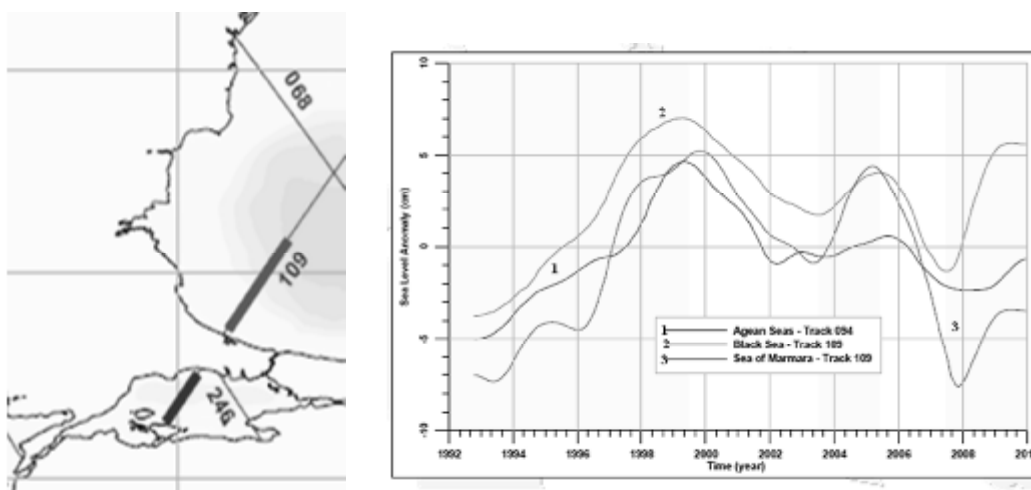


Рис. 1 – Значения орбитальных ошибок для различных спутниковых комплексов [4]



a- ERS-1/2, ENVISAT (35 суток), б- GEOSAT, GEO-1 (17 суток) в – Jason 1/2 (10 суток)

Рис. 2 – Расположение в акватории Черного и Азовского морей треков спутников [4]



а – на 109 треке; б – результаты изменений уровня во времени

Рис. 3 – Результаты измерения уровня с Черноморской и Мрамороморской сторон пролива Босфор по данным проекта Jason 1/2, полученным с дискретностью 10 суток [4]

Результаты получены на одном треке, в связи с чем относительная погрешность позволяет измерять относительные наклоны уровня с более высокой точностью. За 18-летний период уровень моря со стороны Черного моря, как правило был выше. Только в 2005 году наклон уровня практически не фиксировался. Максимальные превышения уровня с Черноморской стороны фиксируются после 2008 г и составляют 7-8 см.

Рассматриваемые перепады уровня влияют на водообмен в проливе, вызывая дополнительные к градиентным, вариации скоростей течений. Как известно, черноморское течение распространяется в проливе Босфор по поверхности у Европейского берега пролива, в то время как мрамороморское течение распространяется у дна и прижимается к азиатскому берегу пролива. Таким образом в проливе формируются высокие пространственные градиенты течений, существуют зоны резкой смены направления течения, что формирует исключительно неблагоприятную навигационную обстановку.

Анализ последних достижений и публикаций

Спутниковые группировки, использующие геоцентрическую систему координат WGS-84, отождествляют геометрический центр Земли с её центром масс, что возможно лишь теоретически. Амплитуды смещения центра масс изучены недостаточно. Так, например в 2001 году геодезическими методами была исследована новая глобальная годовая мода изменений формы Земли [1]. Установлено, что Северное полушарие в марте сжимается за счет расширения Южного полушария. В августе сжимается Южное полушарие. Годовая мода деформаций в марте формирует эффект опускания поверхности геоида на 3 мм в районе Северного полюса, а экваториальное смещение на север составляет 1,5 мм. Траекторный момент нагрузки в виде большого круга, пересекающего континенты достигает $6,9 \cdot 10^{22}$ кг * м вблизи Северного полюса зимой. Это соответствует обмену масс между полушариями $1 \pm 0,2 \cdot 10^{16}$ кг.

В морской навигации спутниковая альтиметрия важна для фиксации наклонов морской поверхности, по значениям которых рассчитывают морские течения. В навигационном плане, наиболее важна информация о течениях в узкостях и проливах. Для ВМС Украины расчеты течений в Керченском проливе и проливе Босфор имеют важное значение. В этих проливах соединяются моря с различными водобалансовыми характеристиками, формирующими наклон уровня поверхности. Кроме этого наклоны уровня создаются сгонно-нагонными ветрами. Течения, формируемые наклонами уровня поверхности, в проливах накладываются на стабильно существующие градиентные течения, обусловленные существующими в проливах градиентами плотности морской воды. Определение наклонов морской поверхности с использованием спутниковой альтиметрии составляет основу метода определения динамической топографии. Наклоны уровня (динамическая топография) в Керченском и Босфорском проливах используются для расчета течений, что исключительно важно для успешного оперативного обеспечения навигации, а иногда и для успешного выполнения поисково-спасательных работ. В качестве примера можно привести события в Керченском проливе 10–11 ноября 2007. В результате шторма танкер «Волгоневфть-139» разломился и затонул, в результате чего произошел разлив нефти, суда «Вольногорск» «Нахичевань» «Ковель», перевозившие серу так же затонули в проливе. Общий объем разлитых нефтепродуктов: 1300 тонн мазута, 2300 тонн смазочных материалов, 25 тонн дизельного топлива. На дне пролива оказалось 5 тыс. т. серы. Не обошлось и без человеческих жертв [2].

Наблюдения за уровнем моря по обе стороны пролива осуществляется контактными методами на береговых постах и с использованием спутниковых технологий. Достоверность данных контактных измерений не может считаться удовлетворительной в связи с неопределенностью геодинамической составляющей, вызываемой вертикальными движениями уровнемерного пункта. Техническое решение данной проблемы состоит в укомплектовании уровнемерного пункта комплексом GPS измерителей, фиксирующих геодинамическую составляющую измерений уровня моря. Однако это не

решает указанную проблему в полном объеме. Существующие ограничения связаны с невыясненной точностью внутрисуточного масштаба GPS измерений в связи с несовершенством учета приливов в твёрдом теле Земли, амплитуда которых может достигать 70 см [3].

Альтернативой контактными измерениями уровня моря являются спутниковые альтиметрические изменения.

Постановка задачи

Цель исследования – повышение точности измерения топографии уровенной поверхности океана путем уточнения прогнозных оценок орбитальных характеристик группировки альтиметрических спутников.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: оценить погрешность прогнозирования орбитальных характеристик альтиметрических спутников, использующих геоцентрическую систему координат WGS-84, определить необходимую для решения навигационных задач точность альтиметрических измерений топографии уровенной поверхности, предложить техническое решение по минимизации систематических погрешностей прогнозирования орбитальных характеристик альтиметрических спутников.

Изложение основного материала исследований

Базовыми положениями в вычислении поправок к орбитальным характеристикам альтиметрических спутников были результаты комплексного изучения прибрежных и альтиметрических измерений уровня в Черном море. Данные для расчетов заимствованы из открытой международной базы данных [5]. В работе [6] на основании данных измерений уровня в Одесском заливе спутниковыми альтиметрическими методами и измерениями уровня на гидрометеорологической станции Одесса-порт были изучены различия спектральных характеристик временных рядов, полученных разными методами. Отличия состоят в том, что спутниковые альтиметрические данные включают гармонику с периодом 305 суток, а контактные прибрежные измерения эту гармонику не фиксируют. Причины данного эффекта требуют объяснения. Контактные измерения, по определению, фиксируют как изменения уровня моря, так и изменения положения суши, относительно уровня моря. Из этого следует, что во временном ряде контактных измерений уровня моря должны присутствовать все гармоники, измеренные альтиметрическими методами, в том числе и гармонику с периодом 305 суток. Если эта гармоника не проявлена в спектре береговых измерений уровня моря, значит она или по амплитуде меньше точности измерений прибрежных измерений (менее 1 см), или она не существует. В работе [6], наличие периодичности 305 суток подтверждено результатами обработки временных рядов измерения уровня моря в 11 точках, расположенных в местах пересечения треков альтиметрических спутников, где точность измерений существенно выше обычной. Изменения топографии уровенной поверхности Черного моря были рассмотрены за двадцатилетний временной промежуток, с 29.09.1992 по 07.08.2002 г.

Для уточнения характеристик периодической составляющей 305 суток изменчивости колебаний уровня Черноморского региона нами были выполнены дополнительные расчеты. Нами были предприняты меры для минимизации влияния аномалий абсолютной динамической топографии на данные измерений. Наиболее корректно расчеты по данным в точке, где положение средне климатической динамической поверхности равно «0». Такая точка имеет координаты 43° с.ш. и 30° в.д. [7]. По данным измерений уровня моря в этой точке был рассчитан энергетический спектр и подтверждено наличие гармоники с периодом 305 суток. В результате расчета интегрированной периодограммы подтверждена статистическая значимость выявленной гармоники. Методом узкополосной фильтрации выделена исследуемая гармоника рис. 4.

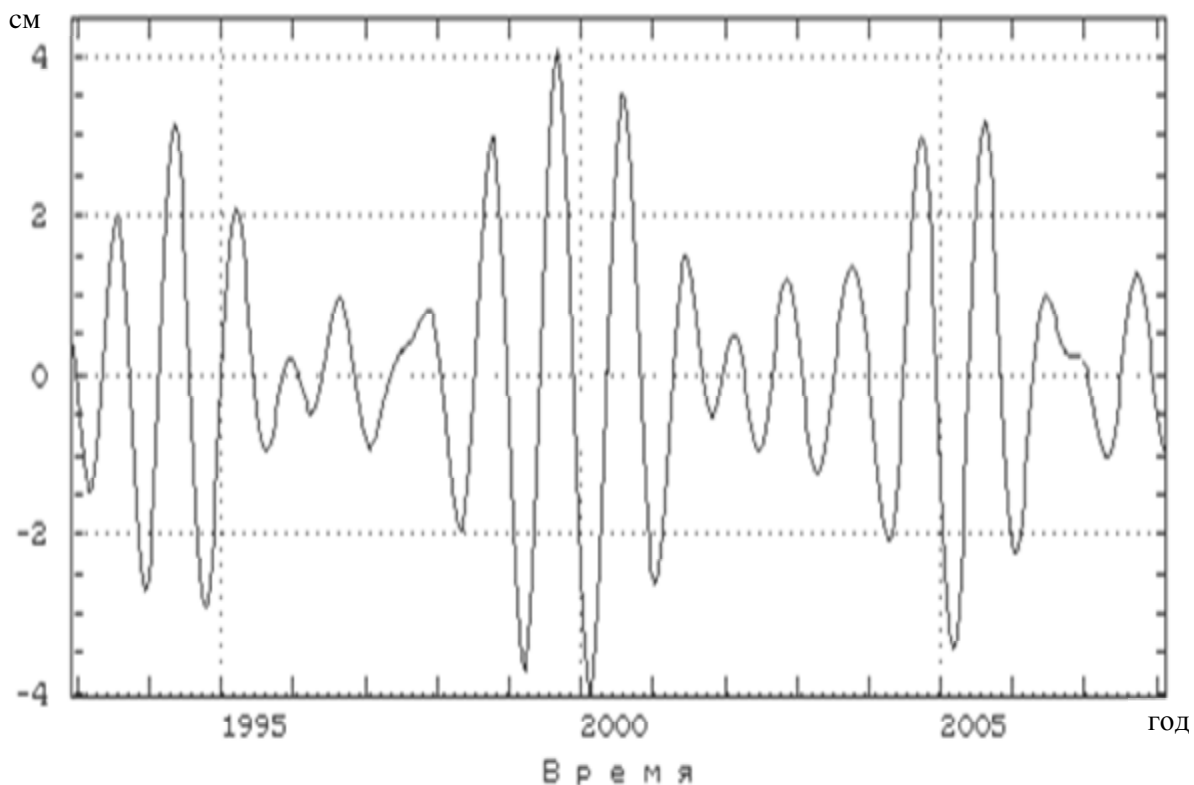
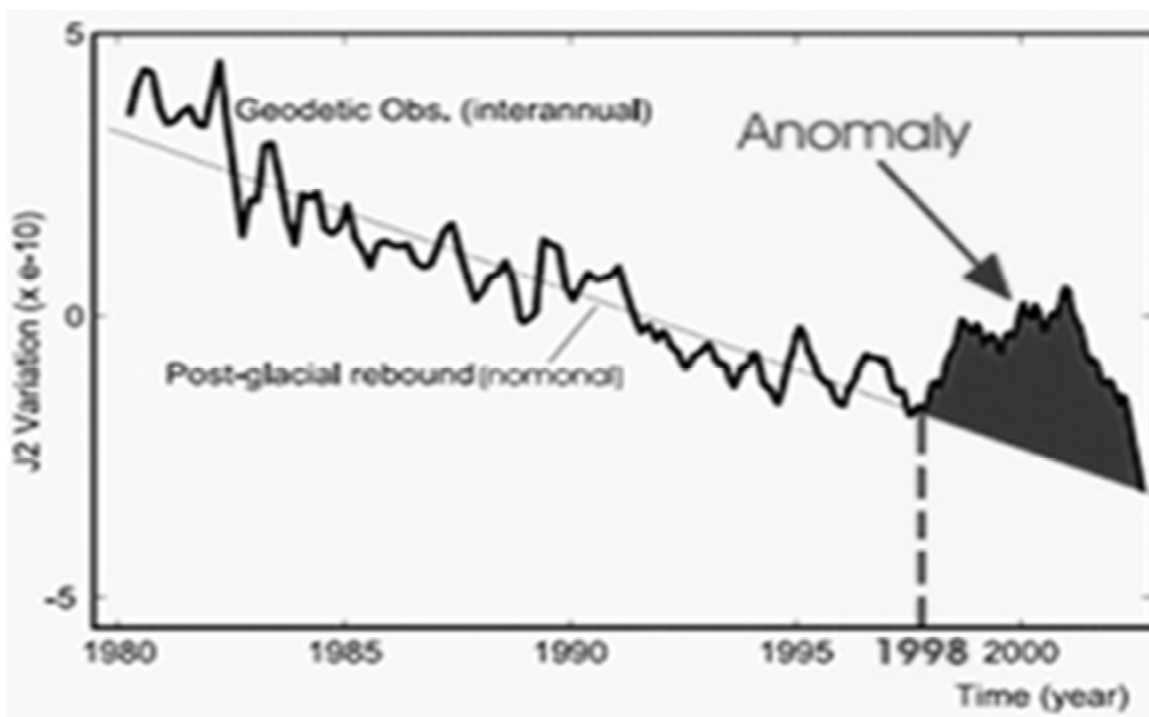


Рис. 4 – Результаты узкополосной фильтрации временного ряда данных изменения уровня Черного моря, измеренного альтиметрическими методами в точке с координатами 43° с.ш. и 30° в.д.

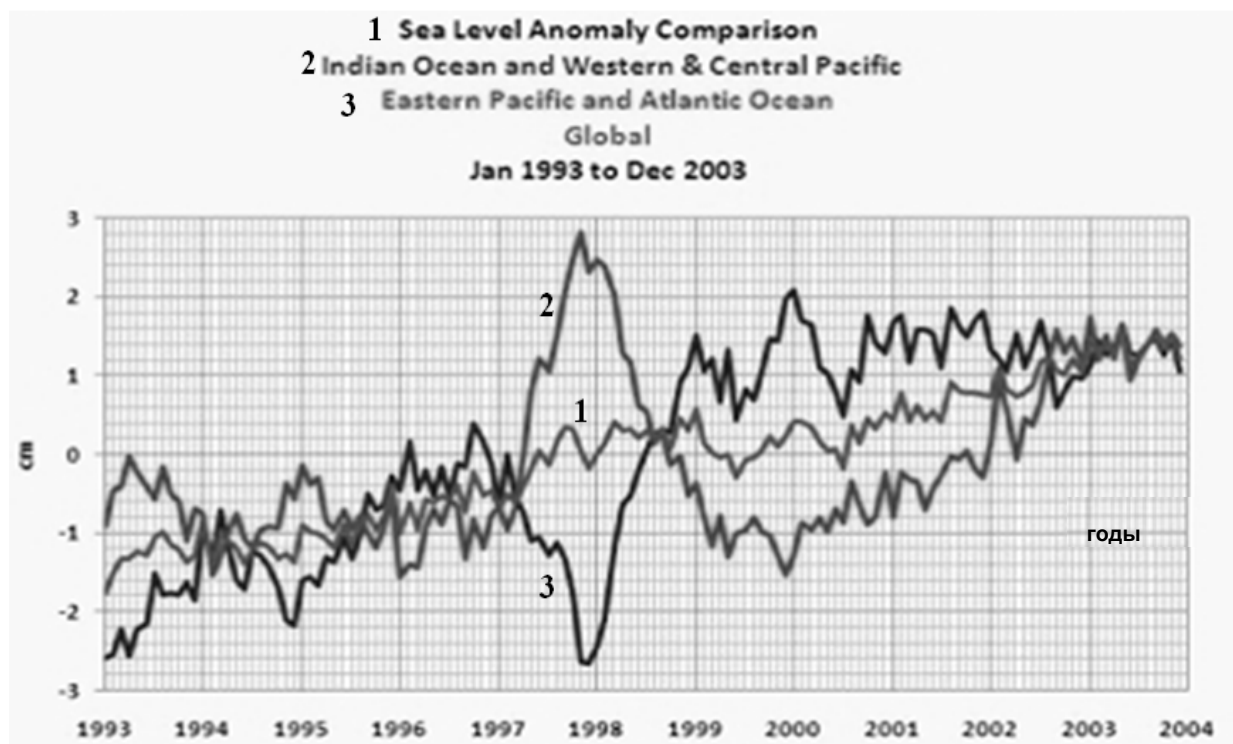
Показано, что амплитуда колебаний может достигать 8 см. Из этого сделан вывод о том, что колебания уровня с такой амплитудой не могли не быть зафиксированы прибрежными измерениями. Это значит, что возможная природа полученных результатов – это отклонение центра масс от геометрического центра Земли. Полученный временной ряд соответствующих отклонений представляет собой ряд орбитальных поправок, которые возможно вводить в оперативном режиме не дожидаясь результатов данных наземных лазерных станций слежения.

С целью проверки достоверности существования сантиметровых отклонений центра масс от геометрического центра в геоцентрической системе WGS-84 были привлечены данные изменения значений коэффициента J_2 (изменения параметра сплюснутости Земли) [8]. В 1998 году было зафиксировано изменение тенденции сплюснутости Земли и при неизменном среднеглобальном уровне Мирового океана альтиметрические данные показали синхронизированное вздымание уровня в восточной части Тихого океана и в Атлантическом океане и соответственное опускание поверхности океана с другой стороны Земли (рис. 5).

Можно предположить, что беспрецедентные за историю наблюдений изменения формы Земли в 1998 году, которые сопровождалась аномалиями её динамических характеристик – скачкообразным увеличением угловой скорости вращения Земли [9] могли сопровождаться смещением центра масс относительно геометрического центра Земли. Нет достоверной информации о том, что спутниковые данные, приведенные на рис. 5 б не подтверждены контактными измерениями, по этой причине гипотетически могут быть рассмотрены как результат изменения орбитальных характеристик спутников, использующих геоцентрическую систему координат WGS-84. Если это так, то результаты измерений, показанные на рис. 5 а – это смещение на 3 см центра масс. Таким образом есть основания предполагать наличие сантиметровых ошибок определения орбитальных характеристик в связи с изменением центра масс Земли в 1998 г. во время аномальных изменений формы Земли и угловой скорости её вращения.



a



б

a – изменения во времени значений коэффициента J_2 , б – изменения во времени среднелобального уровня океана и отдельных его секторов

Рис. 5 – Синхронизированное вздымание уровня в восточной части Тихого и Атлантического океанов [8].

Выводы

Выполнены результаты исследований, направленные на повышение точности вычисления течений с использованием спутниковой альтиметрии. Исследована периодическая составляющая,

присутствующая в данных альтиметрических измерений топографии морской поверхности и не проявленная в данных измерений уровня моря на береговых пунктах. Показано, что амплитуда исследуемой гармоники значительно превышает точность измерения уровня моря на береговых пунктах. На основании этого выдвинуто предположение о том, что измеренная гармоника отражает смещение внутреннего центра масс «жидкого» эллипсоида вращения, которое не создает деформаций внешней твердой оболочки Земли.

Исследование выполнено на примере результатов измерений в районе пролива Босфор. Оценена амплитуда и периодичность амплитудной модуляции этой ошибки.

Перспективы дальнейших исследований

Для определения траектории смещения центра масс относительно геометрического центра Земли необходимо провести аналогичные дополнительные измерения в других географических районах.

Кроме этого установлено, что для периода 305 суток амплитуда колебаний не является стабильной во времени. Максимальные амплитуды продолжительностью 2-3 года перемежаются минимальными амплитудами. Природа этих модуляций требует изучения. В работе [10] указано, что гармоника с периодом 305 суток и годовая гармоника с периодом 365,25 суток синхронизируются раз в шесть лет [10], что сопровождается увеличением интегрированной амплитуды совместного колебательного процесса. По его мнению, этим периодом должны меняться полярный и экваториальный моменты инерции Земли, а, следовательно, Земля должна менять и свою скорость вращения. Амплитуда годовой гармоники изменения угловой скорости вращения Земли действительно меняется с периодом около шести лет [11].

В дальнейшем необходимо исследовать, следует ли шестилетнюю амплитудную модуляцию 305 суточной гармоники формализовать в виде ошибки определения орбитальных характеристик. Основанием для такого предположения можно считать наличие новой глобальной годовой моды геодеформаций, связанной со смещениями ядра Земли [1].

Список использованных источников

1. Blewitt G, Lavallée D, Clarke P, Nurutdinov K. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected, *Science* 14 December 2001: Vol. 294no. 5550 pp. 2342–2345
2. Массовое крушение в Керченском проливе, <http://mortrans.info/chronicle-of-a-disaster/massovoe-krushenie-v-kerchenskom-prolive/>
3. Учитель И. Смена парадигмы современной геодинамики и сейсмотектоники / И. Учитель, Б. Капочкин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, – 80 с.
4. Основы спутниковой альтиметрии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://d33.infospace.ru/d33_conf/lebedev_osn.pdf.
5. Геофизический центр РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/gps/geodat/main.htm>.
6. Михайлов В. И. Современные изменения уровня Черного моря как основа стратегии строительного освоения побережий : монография /В.И. Михайлов, В. С. Дорофеев, В. Н. Ярошенко, Б. Б. Капочкин, Н. В. Кучеренко; – Одесса : Астропринт, 2010.– 165 с.
7. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Mean dynamic topography of the Black sea, computed from altimetry, drifters measurements and hydrology data // *Ocean Sci. Discuss.* 2011. V. 7. No. 6. P. 701–722.
8. TINYPIC [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://i29.tinypic.com/71oa6q.png>.
9. EOP Product Centre [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>.
10. Частота пульсации Земли [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.proza.ru/2013/01/13/977>.
11. Геодинамика. Основы кинематической геодезии / С.П. Войтенко, И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, Б.Б. Капочкин. – О. : Астропринт, 2007. – 264 с.

ПРО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ОРБІТАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГРУПОВАНЬ АЛЬТИМЕТРИЧНИХ СУПУТНИКІВ

І.І. Гладких, Б.Б. Капочкін, В.Ю. Зорін

Виконано розрахунки поправок для уточнення орбітальних характеристик супутникових угруповань укомплектованих альтиметрами. Підвищення точності вимірювань топографії морської поверхні призводить до підвищення точності розрахунку морських течій, що в свою чергу підвищує ефективність проведення морських пошуково-рятувальних робіт.

Ключові слова: *альтиметр, орбітальна помилка, динамічна топографія, протоки, пошуково-рятувальні роботи.*

ABOUT IMPROVE FORECASTING ACCURACY ORBITAL CHARACTERISTICS GROUPING ALTIMETRY SATELLITES

I. Gladkykh., B. Kapochkin., V. Zorin

Calculations of corrections to refine the orbital characteristics of the satellite groups staffed altimeters. Improving the accuracy of measurements of sea surface topography results in an increase accuracy of the calculation of ocean currents, which in turn increases the efficiency of maritime search and rescue operations.

Keywords: *altimeter, orbital error, dynamic topography, straits, search and rescue operations.*