

Спутниковая альтиметрия в науках о Земле

С.А. Лебедев^{1,2}

¹ *Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

E-mail: lebedev@wdcb.ru

² *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

E-mail: sergey_a_lebedev@mail.ru

Статья посвящена достижениям спутниковой альтиметрии в науках о Земле. Область применения спутниковой альтиметрии постоянно растет. Помимо уже ставших классическими задач геодезии данные спутниковой альтиметрии нашли широкое применение во многих науках о Земле – в геологии, океанологии, гляциологии, гидрологии суши, ландшафтоведении и т.д.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, науки о Земле.

Введение

В настоящее время спутниковая альтиметрия по праву заняла свое место среди методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Область применения спутниковой альтиметрии постоянно растет. Помимо уже ставших классическими задач геодезии данные спутниковой альтиметрии активно применяются во многих науках о Земле.

История развития

Развитие спутниковой альтиметрии условно можно разделить на три этапа (Лебедев, Костяной, 2005; Лаврова и др., 2011; Benveniste, 2011).

Первый этап (с 1974 по 1980 г.) – это спутниковые программы SKYLAB-IV, GEOS-3 и SEASAT, связанные с исследованием потенциальной возможности использования спутниковой альтиметрии в геодезии. В целом можно констатировать, что в результате проведения испытаний и обработки данных альтиметрических измерений первых спутников спутниковая альтиметрия достигла уровня точности, при котором представляется возможным использование этих данных для решения практических задач: уточнения модели гравитационного поля Земли (Rapp, 1986; Balmino et al., 1987), расчета параметров приливов в океане (Woodworth, Cartwright, 1986), уточнения рельефа дна (Baudry, Diament, 1987) и динамики вод Мирового океана (Douglas et al., 1984).

Второй этап (с 1985 по 1992 г.) – проведение целенаправленных спутниковых экспериментов GEOSAT и ГЕОИК для решения геодезических программ и исследования возможностей применения спутниковых альтиметрических измерений в других науках о Земле (например, в океанологии, гляциологии, гидрологии и т.д.).

В результате можно констатировать, что первый глобальный эксперимент – геодезическая программа спутника GEOSAT – был успешно выполнен. Совместно с данными предыдущих программ GEOS-3 и SEASAT ее результаты позволили уточнить модель

гравитационного поля Земли, рассчитать аномалии силы тяжести и уточнить рельеф дна для акватории Мирового океана (Медведев, 1980; Rapp, Basic, 1992).

Изомаршрутная программа (программа, предполагающая повторяемость трасс в пределах ± 1 км через определенный период (цикл) времени (Лебедев, Костяной, 2005; Лаврова и др., 2011)) спутника GEOSAT, по мнению многих специалистов, стала началом новой эры в развитии спутниковой океанологии (Denker, Rapp, 1990; Douglas, Cheney, 1990). Именно она стала прообразом системы спутникового мониторинга поверхности Мирового океана.

Третий этап (с 1992 г. по настоящее время) – проведение постоянного мониторинга водной поверхности Мирового океана, окраинных и внутренних морей (спутники ERS-1/2, TOPEX/Poseidon, GFO-1, Jason-1/2, Envisat и др.), а также изучение полярных льдов и поверхности Земли (спутники ICESat и CryoSat-1/2).

Параметры орбит и общие характеристики перечисленных спутниковых миссий, а также основные характеристики размещенных на них альтиметров приведены в работе (Лаврова и др., 2011).

Геодезия и гравиметрия

Современное методическое и техническое состояние развития спутниковой альтиметрии позволяет успешно использовать альтиметрические данные при решении различных геодезических задач. В число этих задач входят уточнение геоцентрической системы координат, вывод глобальных моделей геопотенциала, определение детальных характеристик гравитационного поля Земли в Мировом океане в виде цифровых моделей высот геоида (рис. 1), уклонений отвесных линий, аномалий силы тяжести (рис. 2), установление и поддержание общеземной системы высот (Медведев, 1980).

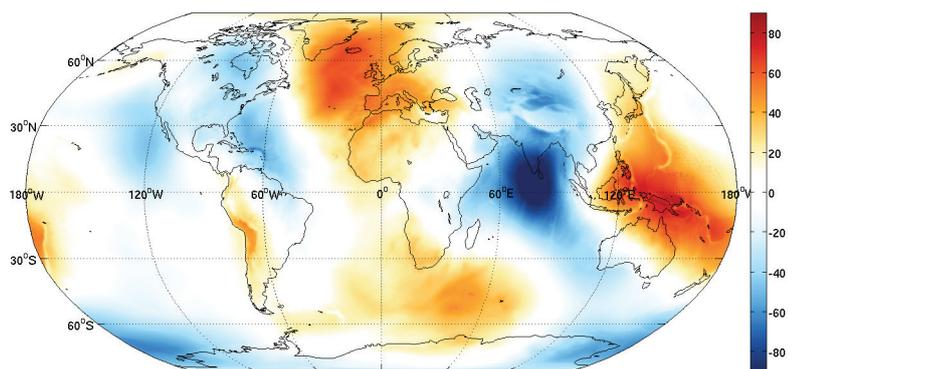


Рис. 1. Высота геоида (м), рассчитанная по модели EGM2008 (Pavlis et al., 2012) с разложением на сферические функции до 500 степени

Существенным ограничением метода спутниковой альтиметрии является то, что как метод изучения гравитационного поля Земли он принципиально не работает на суше и над акваториями, покрытыми льдом. Вследствие этого для получения глобального покрытия земного шара измерениями гравитационных аномалий данные спутниковой альтиметрии в океанах необходимо комбинировать с данными гравиметрической съемки на суше и море (Seeber, 2003).

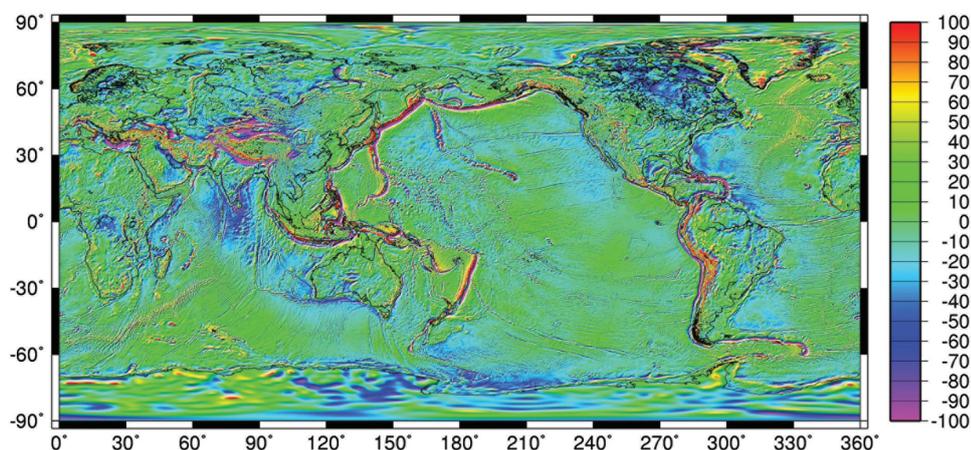


Рис. 2. Аномалии силы тяжести (мГал = 10^{-3} м/с²), рассчитанные по модели EGM2008 (Pavlis et al., 2012)

Анализ принципиальных основ и опыта использования спутниковой альтиметрии показал, что основным преимуществом данного метода по сравнению с традиционными методами изучения гравитационного поля и фигуры Земли, в частности гравиметрической съемкой, можно считать потенциально высокую точность измерения гравитационных аномалий в сочетании с высокой оперативностью (Медведев, 1980; Tapley, Kim, 2001).

По теоретическим оценкам спектральных плотностей сигнала и шума, разрешающая способность систем спутниковой альтиметрии по длинам волн аномалий силы тяжести находится на уровне 30 км, а точность составляет 8 мГал. По этим оценкам, метод спутниковой альтиметрии в 8...10 раз уступает современным средствам морской гравиметрической съемки в плане точности и детальности определения гравитационных аномалий. Однако, как показали результаты сравнения реальных данных спутниковой альтиметрической и морской гравиметрической съемки, теоретические оценки не в полной мере соответствуют действительности. Фактически современные данные спутниковой альтиметрии вполне могут рассматриваться в качестве альтернативного источника информации для картографирования аномалий силы тяжести в масштабе 1 : 1 000 000 с сечением 10 мГал (Железняк, Конешов, 1995). Более того, комплексное использование данных, полученных различными системами спутниковой альтиметрии, потенциально позволяет на значительной части акватории Мирового океана обеспечить определение аномалий силы тяжести с точностью около 5 мГал и разрешением не хуже 20 км (Дробышев и др., 2004).

В настоящее время уровень точности определения гравитационных аномалий в Мировом океане по данным спутниковой альтиметрии позволяет исключить необходимость выполнения трудоемкой и дорогостоящей площадной гравиметрической съемки на большей части акватории Мирового океана (Пешехонов и др., 1989; Македонский и др., 1992).

Наиболее точная на сегодняшний день гравитационная модель Земли EGM2008 (Pavlis et al., 2012) (рис. 1–2) в качестве исходных данных использует наземные и морские гравиметрические измерения, альтиметрические данные и данные международных космических проектов GRACE и CHAMP. Она имеет разрешение 2,5' x 2,5' по пространству с разложением по сферическим гармоникам до 2159 степени и содержит дополнительные

сферические гармонические коэффициенты до степени 2190. Точность вычисления ключевых параметров гравитационного поля Земли оценивается на уровне 11 см для высоты геоида и 1" для уклонения отвесных линий (Пигин, Березина, 2008; Crossley et al., 2013).

Батиметрия Мирового океана

Метод спутниковой альтиметрии позволил существенно уточнить батиметрию или «топографию» дна Мирового океана. Аномалии силы тяжести, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии, отображают особенности рельефа океанического дна (рис. 3).

В работе (Smith, Sandwell, 1994) на основе карт аномалии силы тяжести представлена карта нового типа *предполагаемого* рельефа дна (Predict Topography). Карта наглядно отражает крупные структурные формы дна, особенно такие формы, как хребты, разломы, поднятия, цепи гор и даже отдельные вулканические горы (рис. 4). Она полезна при интерпретации геолого-геофизических данных. В малоисследованных районах она отражает еще *неоткрытые* формы рельефа, подсказывая наиболее перспективные районы дальнейших исследований.

Сравнение карты *предполагаемого* рельефа с физиографической картой Мирового океана (Heezen, Tharp, 1977), построенной по данным эхолотных съемок, показывает, насколько провидческой была комплексная интерпретация батиметрических и геолого-геофизических данных, выполненных авторами в 1960-1970 гг. Дальнейшие исследования рельефа дна и их сопоставление с картой *предполагаемого* рельефа подтвердили, что характерные формы рельефа дна, приведенные на карте (Heezen, Tharp, 1977), существуют, а детальные съемки помогают уточнить строение рельефа, положение и простираание отдельных форм.

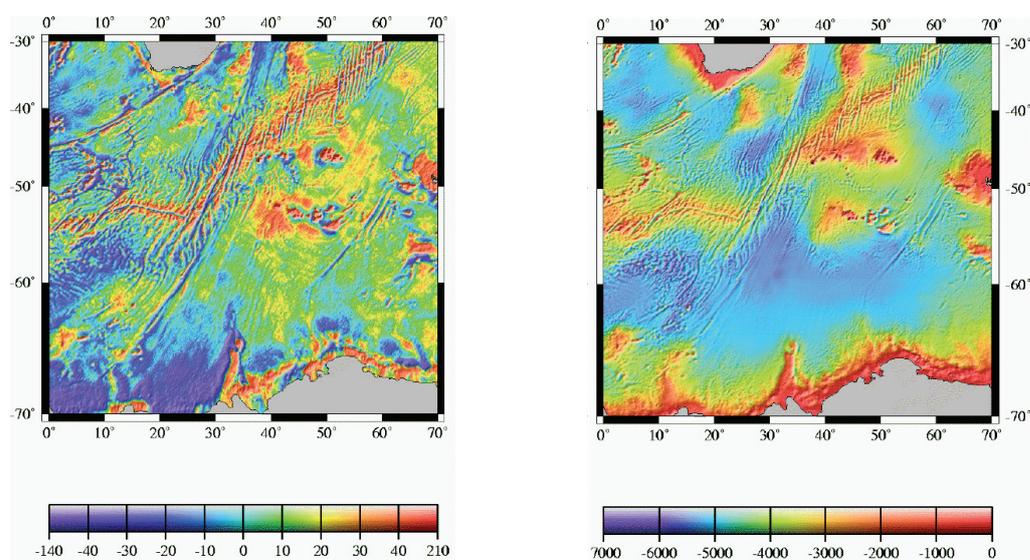


Рис. 3. Связь (а) аномалий силы тяжести (мГал), рассчитанных по данным спутниковой альтиметрии, и (б) предполагаемого рельефа дна (м) южной части Атлантического и Индийского секторов Южного океана в районе Капской котловины, котловины Агульяс, Африканско-Антарктического хребта и Африканско-Антарктической котловины

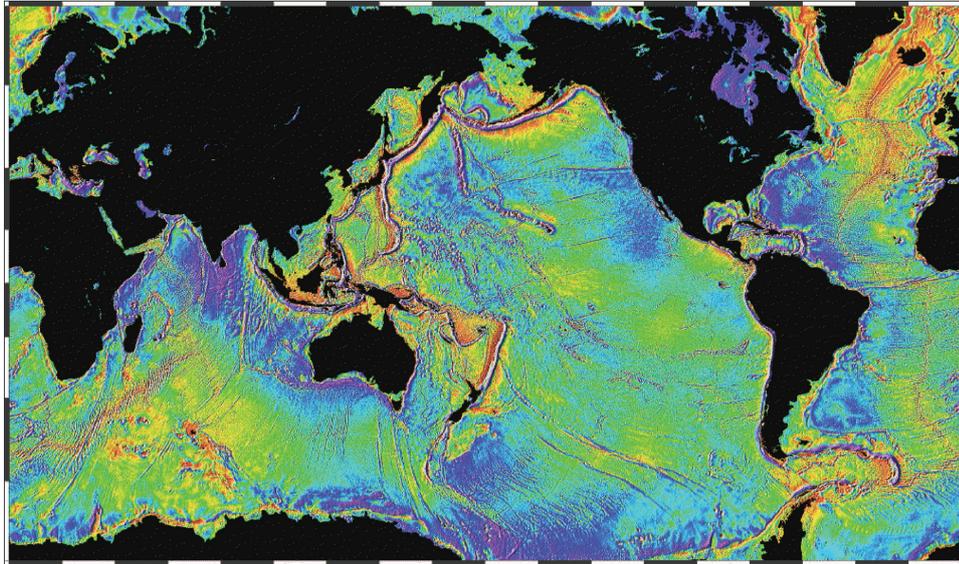


Рис. 4. Карта предполагаемого рельефа дна Мирового океана, рассчитанного по данным спутниковой альтиметрии (Smith, Sandwell, 1997)

Так, судовые измерения рельефа дна Мирового океана подтвердили существование неизвестных ранее абиссальных холмов, подводных гор и цепей вулканических хребтов. В настоящее время наиболее полная база данных по подводным горам Тихого океана, созданная на основе анализа данных спутниковой альтиметрии, содержит информацию о примерно 150 000 подводных гор высотой более 1 км (Wessel, 2001).

Геология

Спутниковые альтиметрические измерения стали одним из новых методов в выявлении общих закономерностей геологического строения дна Мирового океана, так как аномалии силы тяжести и высот морского геоида весьма чувствительны к обширным неоднородностям гравитационного поля Земли (Cazenave, Okal, 1986).

Поле высот геоида на акватории Мирового океана, построенное по данным спутниковой альтиметрии с пространственным разрешением 5' (Smith, Sandwell, 1997), позволило изучать внутреннее строение Земли по его аномалиям. В основе такой интерпретации лежит частотный анализ. Если поле высот геоида разложить по сферическим функциям, то гармоники 2...4 порядка отображают топографию границы ядро-мантия, 4...10 – аномалии плотности в нижних частях мантии. Гармоники 10...14 порядка соответствуют аномалиям плотностей средней мантии на глубинах 600...2000 км. Гармоники более высокого порядка (14...18) связаны с плотностными изменениями в верхней мантии и на нижней границе литосферных плит, расположенной на глубинах до 300 км. Коротковолновые аномалии геоида (гармоники 18...22 порядка) представляют интерес для изучения верхнего слоя земной коры и топографии дна океана (Cazenave, Royer, 2001).

Таким образом, численные модели высот геоида Мирового океана, построенные по данным спутниковых альтиметрических измерений, представляют собой прекрасный

материал для изучения внутреннего строения Земли под океаном. Спутниковые измерения высот геоида выявили крупномасштабные проявления тектоники плит, срединно-океанических хребтов, преобразование разломов и вулканических цепей (Plk et al., 2004).

Океанология

Создаваемая для решения геодезических задач спутниковая альтиметрия нашла широкое применение также в океанологии (Satellite Altimetry..., 2001; Fu, Le Traon, 2006). Она позволила исследовать синоптическую изменчивость крупномасштабной динамики Мирового океана, уточнить глобальные модели приливов (Гусев, Лебедев, 2013), исследовать синоптические вихри и меандры сильных струйных течений, планетарные волны, волны цунами, морские льды и многое другое.

В настоящее время наблюдается тенденция к переходу от исследования крупномасштабных явлений в Мировом океане к исследованиям отдельных акваторий, внутренних и окраинных морей.

Динамика океана

Спутниковая альтиметрия – единственный тип данных ДЗЗ, позволяющий вне зависимости от погодных условий на регулярной основе создавать карты динамической топографии морской поверхности. Сегодня точность альтиметров достигла такого уровня (Лаврова и др., 2011), что дает возможность рассчитывать по градиентам уровня моря поля поверхностных геострофических течений (Сирота и др., 2004; Кошляков и др., 2007).

Различают два вида динамической топографии (ДТ): *среднюю* (или *среднеклиматическую*) и *синоптическую*. Среднеклиматическая ДТ определяется как отклонение средней высоты морской поверхности от высоты морского геоида. Она рассчитывается по данным спутниковой альтиметрии, дрейфующих буев и результатам расчетов по термогидродинамическим моделям (Tarpley, Kim, 2001). Различают глобальные (*рис. 5*) (Лебедев, Костяной, 2005; Rio et al., 2006) и региональные (*рис. 6*) (Кубряков, Станичный, 2011; Лебедев, 2012; Lebedev, 2012) модели среднеклиматической ДТ. Синоптическая динамическая топография определяется как суперпозиция среднеклиматической ДТ и аномалий уровня моря, рассчитанных по данным спутниковой альтиметрии (Сирота и др., 2004; Лебедев, Сирота, 2004).

Альтиметрические измерения высот водной поверхности на регулярной основе проводятся более 20 лет, поэтому можно изучать как внутригодовую, так и межгодовую изменчивость уровня и ДТ Мирового океана, отдельных его акваторий, внутренних и окраинных морей и анализировать факторы, вызывающие эту изменчивость (Сирота и др., 2004).

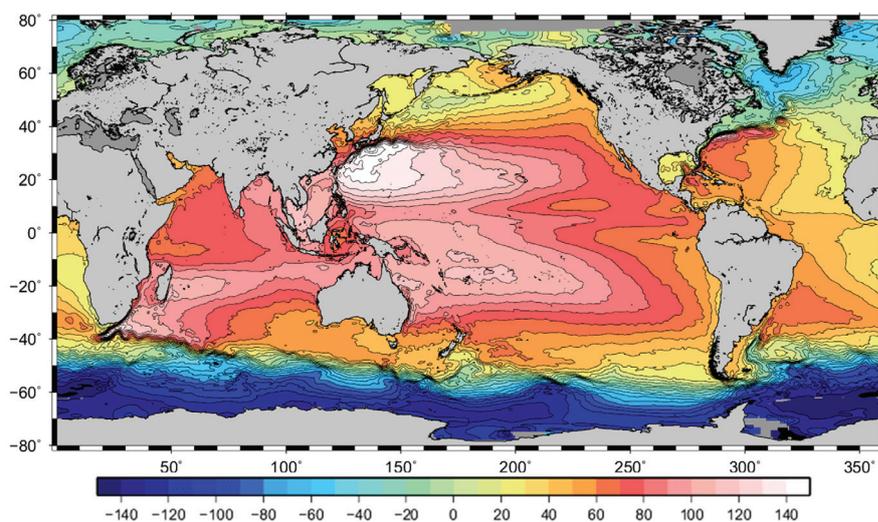


Рис. 5. Среднеклиматическая динамическая топография (см) Мирового океана CNES-CLS09 (Rio et al., 2011)

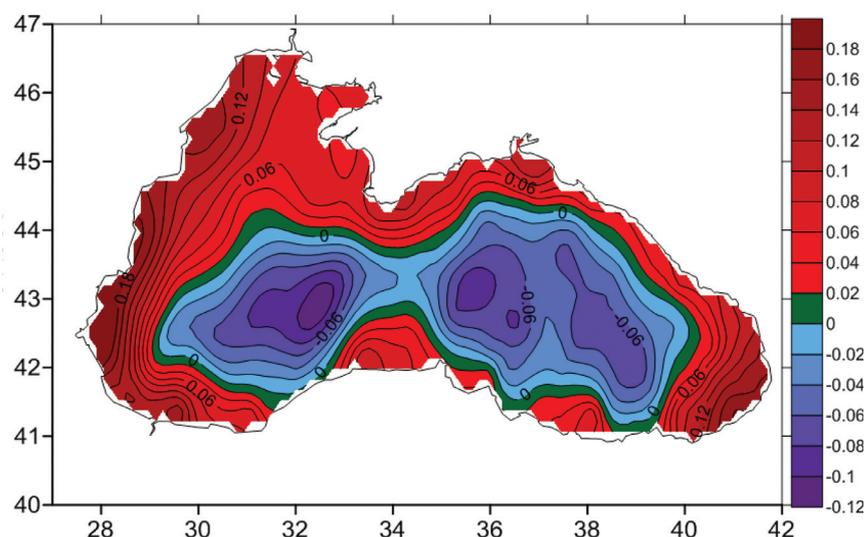


Рис. 6. Среднеклиматическая динамическая топография (м) Черного моря (Kubryakov, Stanichny, 2011)

Поле синоптической ДТ позволяет анализировать пространственно-временную изменчивость положения океанских фронтов (Костяной и др., 2003; Kostianoy et al., 2004; Sirotа et al., 2004), положения струйных течений (Lebedev, Sirotа, 2007) и переноса воды и тепла на основе поля геострофических скоростей, рассчитанных по градиенту ДТ (Кубряков и др., 2011; Мысленков, 2011), а также вихревую активность (Fu, Le Traon, 2006) и изменчивость планетарных градиентно-вихревых волн (Белоненко и др., 2004; Cipollini et al., 2010).

Изменчивость уровня Мирового океана

На протяжении многих десятилетий стандартные измерения уровня Мирового океана (УМО) производятся на уровне береговых постов. В настоящее время сеть береговых постов насчитывает более 1700 объектов, которые Межправительственной океанографической комиссией при ЮНЕСКО объединены в единую международную систему GLOSS (Global Sea Level Observing System) – Глобальную систему наблюдений за уровнем моря.

Данные колебаний УМО на уровневых постах включают, как минимум, две трудно вычисляемые погрешности, которые определяются геодинамическими движениями самих футштоков, обусловленными вертикальными движениями земной коры, и изменениями уровня, связанными с береговыми эффектами, не характерными для открытого моря (Костяной и др., 2012). Спутниковая альтиметрия дает измерения высоты поверхности моря или его уровня относительно отсчетного эллипсоида, связанного с центром масс Земли, поэтому вертикальные движения земной коры исключены из измерений.

Изменения УМО представляют собой сложный процесс, формируемый совокупностью различных по своей природе факторов: эвстатических, стерических и деформационных (Клиге и др., 2012; Малинин, 2012). Эвстатические колебания обусловлены изменениями компонент водного и ледового балансов: осадки, испарение, приток речных вод, айсберговый сток и т.д. Стерические (плотностные) колебания обусловлены изменениями плотности морской воды, прежде всего за счет изменения ее температуры. К деформационным колебаниям относятся: вертикальные движения земной коры и донное осадконакопление.

Отметим, что роль отдельных компонент в суммарных колебаниях УМО существенно различна (Малинин, Шевчук, 2008; Глок, Малинин, 2011; Малинин, 2012).

Спутниковая альтиметрия дает информацию об изменчивости уровня, которая включает в себя все три составляющие изменчивости УМО. За период с 1993 по 2012 гг. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX / Poseidon и Jason-1/2 наблюдался подъем УМО со скоростью $3,2 \pm 0,4$ мм/г (Nerem et al., 2010). Однако на этом временном интервале скорость изменения УМО была неравномерной как по времени (рис. 7), так и по акватории Мирового океана (рис. 8). Максимальная скорость подъема уровня наблюдалась в Тихом океане восточнее Филиппинских островов, а падения – в тихоокеанском секторе Южного океана (Лебедев, 2006; Lebedev, 2007; Лебедев, 2011). Большие скорости подъема и понижения УМО наблюдаются в районе сильных струйных течений Гольфстрим и Куроисио (рис. 8).

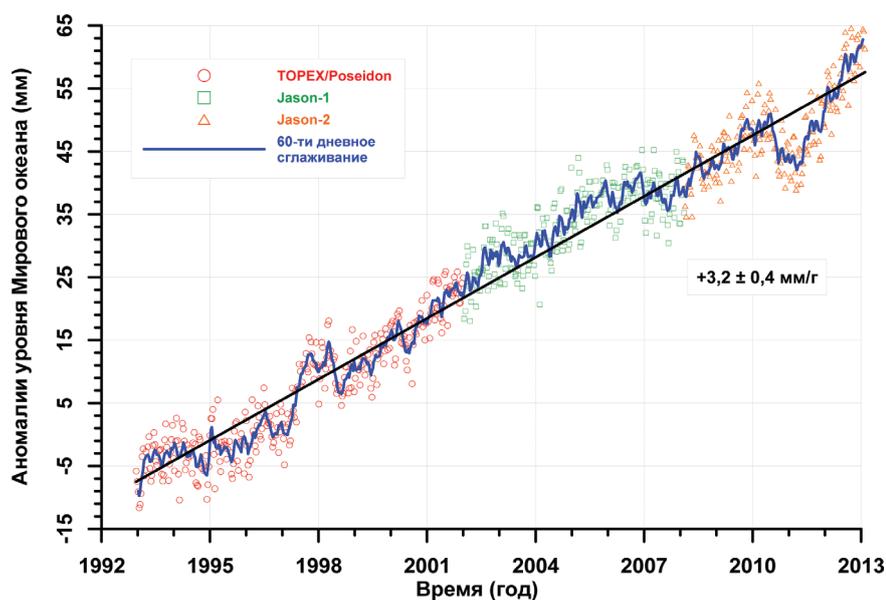


Рис. 7. Межгодовая изменчивость уровня Мирового океана по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2

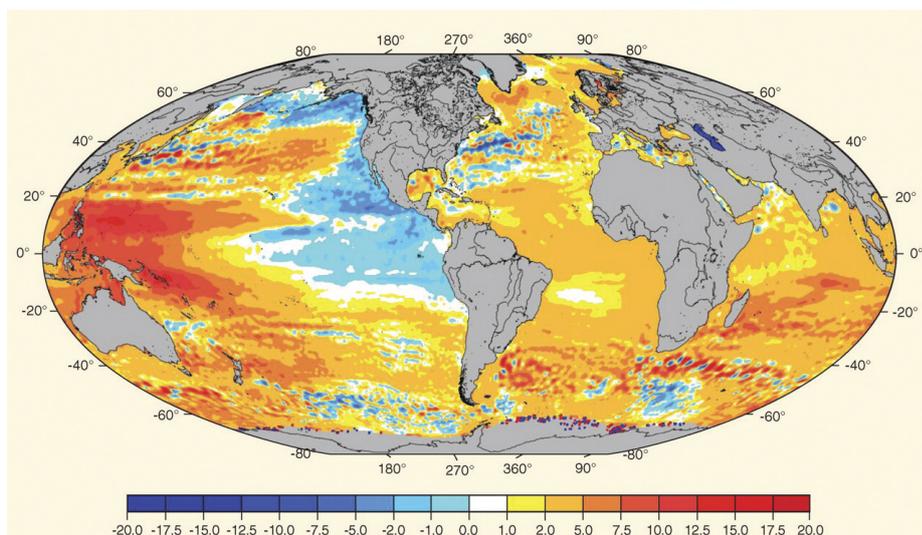


Рис. 8. Пространственная изменчивость скорости изменения уровня Мирового океана (мм/г) за период 1993–2009 гг. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 (Technical considerations..., 2010)

Данные об уровне океанов, полученные с борта спутников, дают уникальную возможность наблюдать распространение волн цунами по акватории океанов (Зайченко и др., 2005; Куликов др., 2005; Troitskaya, Ermakov, 2006) (рис. 9).

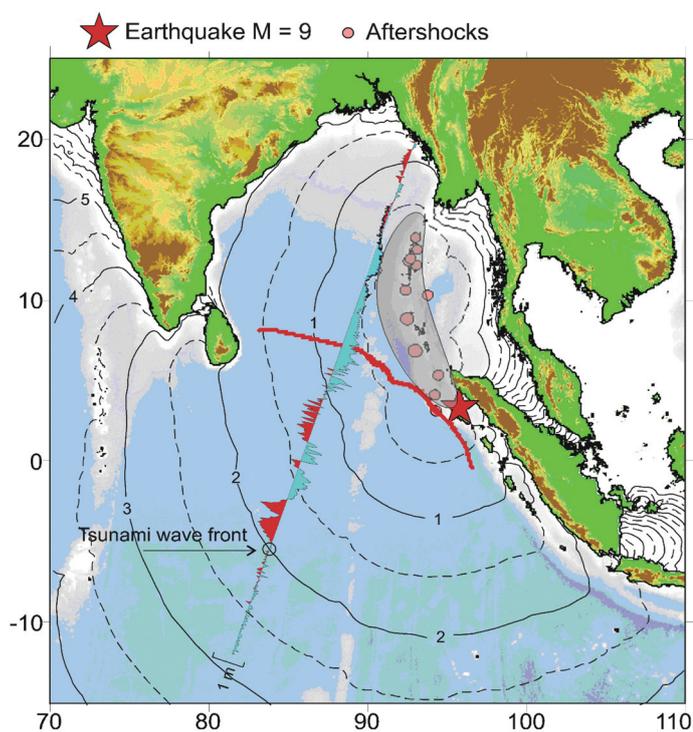


Рис. 9. Карта северо-восточной части Индийского океана с изохронами, показывающими вычисленные положения фронта цунами 24 декабря 2004 г., и изменчивость уровня моря вдоль 109-го трека спутника Jason-1 (Левин, 2010)

Гляциология

Точные сведения о топографии ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии являются фундаментальной основой для гляциологических исследований (рис. 10). Цифровые модели высот топографии необходимы для гляциодинамического моделирования скорости и направления движения ледников, для реконструкции эволюции ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии и оценок прошлых и будущих изменений их массы. Повторные высокоточные определения высоты поверхности ледника позволяют оценить баланс массы льда, что вызывает особый интерес в условиях изменения климата.

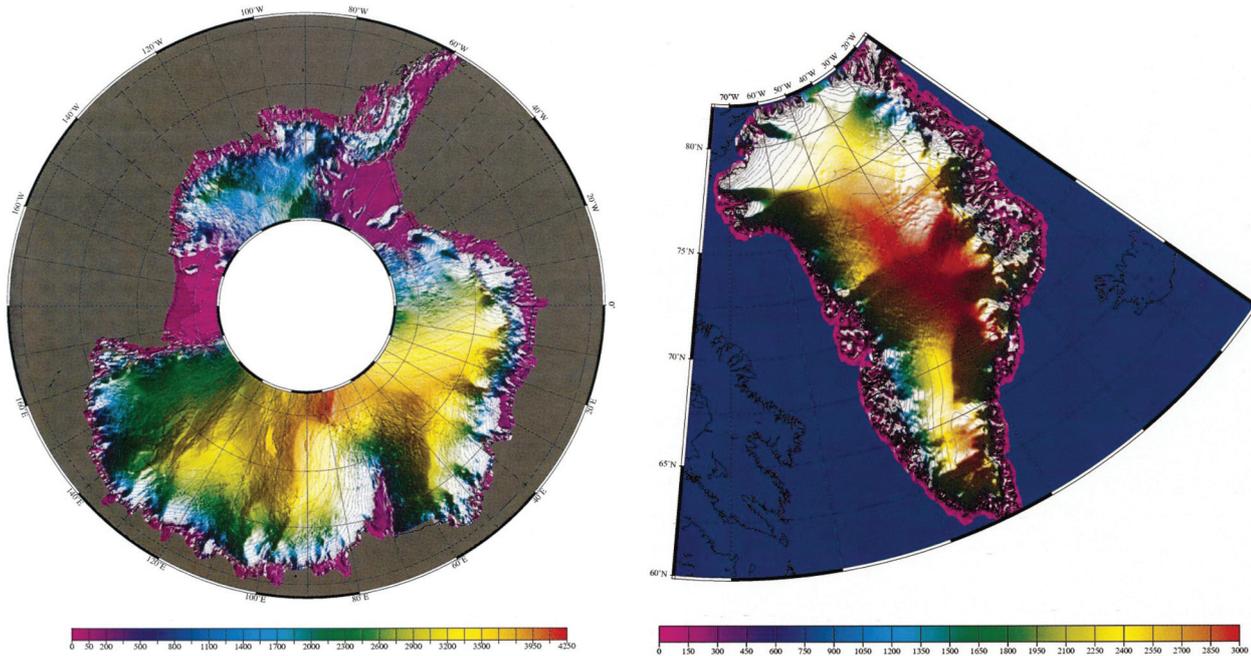


Рис. 10. Карта ледникового щита (а) Антарктиды и (б) Гренландии с разрешением 2" по данным геодезической программы спутника ERS-1 (Remy et al., 1999)

Спутниковая альтиметрия показала, что динамическое истончение быстро движущихся прибрежных ледников сейчас широко распространено на всех широтах. В период между 2003 и 2007 гг. ледники Гренландии перемещались быстрее, чем на 100 м в год, утончаясь в среднем на 0,84 м в год (Pritchard et al., 2009). Данные альтиметрии по семи ледниковым комплексам Шпицбергена показали, что за период 1996–2002 гг. они в среднем утончались на 0,19 м в год, т.е. в 1,6 раза быстрее, чем по балансовым оценкам за более длительный 19-летний период (Кренке и др., 2012).

Гидрология суши

Изучение гидрологического режима многих крупных озер и рек планеты важно как для оценки запасов пресной воды, изучения водного баланса внутренних морей и т.д., так и для анализа произошедших климатических и антропогенных изменений, прогноза их гидрологического режима и оценки вероятности природных катаклизмов.

Для некоторых озер и рек гидрологическую информацию об их уровне и расходах воды часто трудно получить из-за недоступности области исследований (например, бассейн реки Амазонки или некоторых рек Африки: Конго, Нигер и др., высокогорные озера Тибета и т.д.), малочисленности или отсутствия уровенных постов или запаздывания передачи данных в центр обработки. В этом случае спутниковая альтиметрия имеет огромный потенциал в исследовании временной изменчивости высоты водной поверхности озер, водохранилищ и рек (Koblinsky et al., 1993; Birkett, 1998; Лебедев, Костяной, 2005; Birkett, Beckley, 2010; Троицкая и др., 2012; Лебедев, Костяной, 2013).

К настоящему времени проведены исследования гидрологического режима более 200 озер, 60 водохранилищ и 25 рек и их бассейнов. Создано три интернет-ресурса: «Geodesy, Oceanography et Hydrologie from Space (GOHS)» (Créaux et al., 2011), «USDA Global Reservoir and Lake Monitor» (Birkett et al., 2011) и «River and Lake» (Benveniste, Berry, 2004), на которых собраны результаты исследования временной изменчивости уровня воды озер, водохранилищ и рек по данным спутниковой альтиметрии.

Единственным ограничением данных спутниковой альтиметрии для исследования гидрологического режима вод суши является фиксированное расположение треков изомаршрутных программ на поверхности Земли и минимальная ширина водного объекта (более 1 км) (Troitskaya et al., 2012).

Ландшафтоведение

Регулярные альтиметрические измерения, оптимизированные для океанов и морей, также проводятся во время полета над сушей. Отраженный от поверхности суши радиопульс имеет более сложную форму и требует разработки специализированных алгоритмов обработки сигнала (ретрекинга). Однако и стандартные алгоритмы ретрекинга позволяют проводить анализ шероховатости подстилающей поверхности суши. Коэффициент обратного рассеяния дает информацию о том, покрыта подстилающая поверхность суши снегом, растительностью или затоплена водой.

Анализ сезонных аномалии коэффициента обратного рассеяния по данным спутника TOPEX / Poseidon показал, что значительные колебания наблюдаются в регионах, которые покрыты зимой снегом (выше 55° с. ш.), или на которые оказывает существенное влияние сезон дождей (экваториальные районы и Индия) (Papa et al., 2003).

Совместное использование данных спутниковой альтиметрии и спутниковой радиометрии (большинство спутников, выполняющих альтиметрические измерения, оснащены радиометрами подспутникового следа) дает уникальную возможность мониторинга лесов, пустынь, тростниковых зарослей в дельтах рек (Zakharova et al., 2007); продолжительности устойчивого снежного покрова; толщины снега, состояния растительного покрова в зависимости от сезона (Papa et al., 2002); обводненности территории (Колмакова и др., 2012). В последние годы эта новая область применения спутниковой альтиметрии приобретает все большее значение как дополнение к другим методам ДЗЗ.

Заключение

За двадцать лет своего развития спутниковая альтиметрия шагнула далеко за рамки классических геодезических задач, которые были поставлены перед ней на первом этапе ее становления. Уточненное по данным спутниковой альтиметрии гравитационное поле Земли повысило как точность расчета высот орбит спутников, так и точность самих альтиметрических измерений, которая достигла величины нескольких сантиметров.

В настоящее время в использовании спутниковой альтиметрии наблюдается переход от решения задач, связанных с исследованием гидрологического и гидродинамического режимов Мирового океана, к проблемам внутренних и окраинных морей, а также крупных озер, водохранилищ и рек.

Спутниковая альтиметрия стала незаменимым инструментом в исследовании климатических изменений уровня Мирового океана и крупнейших ледовых щитов Гренландии и Антарктики. Новой областью применения данных спутниковой альтиметрии стало ландшафтоведение.

Разработка и вывод на орбиту новых альтиметров не только позволит повысить точность альтиметрических измерений, но и существенно расширит круг задач, решаемых с использованием этого типа данных ДЗЗ.

Литература

1. Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в океане. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 214 с.
2. Глок Н.И., Малинин В.Н. Статистический анализ стерических колебаний уровня Мирового океана // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 21. С. 126–136.
3. Гусев И.В., Лебедев С.А. Учет влияния океанических приливов при наблюдении геодезических искусственных спутников Земли // Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. 2013. № 1. С. 25–32.
4. Дробышев Н.В., Железняк Л.К., Клевцов В.В. и др. Погрешность спутниковых определений силы тяжести на море // Физика Земли. 2004. № 5. С. 92–96.
5. Железняк Л.К., Конешов В.Н. Оценка погрешностей данных спутниковой альтиметрии по сравнению с гравиметрическими материалами // Физика Земли. 1995. № 1. С. 76–81.
6. Зайченко М.Ю., Куликов Е.А., Левин Б.В. и др. О возможности регистрации цунами в открытом океане по данным спутникового альтиметра // Океанология. 2005. Т. 45. № 2. С. 222–229.
7. Клиге Р.К., Малинин В.Н., Гордеева С.М. и др. Факторы изменения уровня океана // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 4.: Факторы глобальных изменений / Отв. ред. Н.С. Касимов, Р.К. Клиге. М.: Научный мир, 2012. С. 302–317.
8. Колмакова М.В., Захарова Е.А., Кураев А.В. и др. Временная изменчивость климата и обводненности территории Западной Сибири по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 364. С. 173–180.

9. *Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. и др.* Фронты и мезомасштабная изменчивость в южной части Индийского океана по альтиметрическим данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 5. С. 671–682.
10. *Костяной А.Г., Лебедев С.А., Терзиев Ф.С. и др.* Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Науч. ред. С.М. Семенов. Росгидромет, 2012. С. 430–478.
11. *Кошляков М.Н., Лисина И.И., Морозов Е.Г. и др.* Абсолютные геострофические течения в проливе Дрейка по наблюдениям 2003 и 2005 гг. // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 4. С. 487–500.
12. *Кренке А.Н., Ананичева М.Д., Демченко П.Ф. и др.* Ледники и ледниковые системы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Науч. ред. С.М. Семенов. Росгидромет, 2012. С. 360–399.
13. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // *Исследование Земли из космоса*. 2011. № 4. С. 1–7.
14. *Кубряков А.А., Станичный С.В., Плотников Е.В.* Определение полей скоростей поверхностных течений дистанционными методами // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа* 2011. Вып. 24. С. 299–307.
15. *Куликов Е.А., Медведев П.П., Лаппо С.С.* Регистрация из космоса цунами 26 декабря 2004 г. в Индийском океане // *ДАН*. 2005. Т. 401. № 4. С. 537–542.
16. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
17. *Лебедев С.А.* Межгодовая изменчивость температуры поверхности и уровня Южного океана по данным дистанционного зондирования // *Ученые записки РГГМУ*. 2006. № 6. С. 82–88.
18. *Лебедев С.А.* Климатическая изменчивость температуры поверхности и уровня Южного океана по данным дистанционного зондирования // *Труды ГОИН*. 2011. Вып. 213. С. 103–109.
19. *Лебедев С.А.* Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 3. С. 224–234.
20. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Издательский центр «МОРЕ» Международного института океана, 2005. 366 с.
21. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковый мониторинг трансграничных вод России и Эстонии // *Материалы II Международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий»*, посвященной 20-летию МГТУ, Майкоп, 14–17 мая 2013. Майкоп: Изд-во Магарин О.Г., 2013. С. 152–169.

22. *Лебедев С.А., Сирота А.М.* Применение данных спутниковой альтиметрии в промыслово-океанологических исследованиях юго-восточной части Тихого океана // Вопросы рыболовства. 2004. Т. 5. № 19. С. 482–488.
23. *Левин Б.В.* Проблема цунами: вчера, сегодня, завтра // Вестник ОНЗ РАН. 2010. Т. 2. NZ10002.
24. *Македонский Е.Л., Непоклонов В.Б., Задорожко Л.И.* Моделирование гравитационного поля Земли для коррекции измерительных и навигационных средств. СПб.: ЦНИИ Электроприбор. 1992. 58 с.
25. *Малинин В.Н.* Уровень океана: настоящее и будущее. СПб.: РГГМУ, 2012. 260 с.
26. *Малинин В.Н., Шевчук О.И.* Эвстатические колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях // Известия РГО. 2008. Т. 140. Вып. 4. С. 20–30.
27. *Медведев П.П.* Исследование гравитационного поля и фигуры Земли новыми методами космической геодезии // Итоги науки и техники. Серия: Геодезия и аэросъемка. Т. 17. М.: ВИНТИ, 1980. 99 с.
28. *Мысленков С.А.* Использование спутниковой альтиметрии для расчета переноса вод в Северной Атлантике // Труды ГУ «Гидрометцентр России». 2011. Вып. 345. С. 119–125.
29. *Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Старосельцев Л.П. и др.* Судовые средства измерения параметров гравитационного поля Земли. Л.: ЦНИИ Румб. 1979. 29 с.
30. *Пигин А.П., Березина С.В.* Глобальная модель геоида EGM2008. Предварительный анализ // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2008. № 4 (31). С. 63–66.
31. *Сирота А.М., Лебедев С.А., Тимохин Е.Н. и др.* Использование спутниковой альтиметрии для диагноза промыслово-океанологических условий в Атлантическом и юго-восточной части Тихого океанов. Калининград. АтлантНИРО, 2004. 68 с.
32. *Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А. и др.* Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 2. С. 169–185.
33. *Balmino G., Moynot B., Sarrailh M. et al.* Free air gravity anomalies over the oceans from SEASAT and GEOS-3 altimeter data // EOS Trans. 1987. No. 68. P. 17–19.
34. *Baudry N., Diament M.* Shipboard confirmation of SEASAT bathymetric predictions in the south central Pacific // Seamounts, Islands, and Atolls / Eds. B.H. Keating et al. Geophys. Monogr. Ser. 1987. V. 43. P. 115–122.
35. *Benveniste J.* Radar altimetry: Past, present and future // Coastal Altimetry / Eds. S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2011. P. 1–17.
36. *Benveniste J., Berry P.* Monitoring river and lake levels from space // ESA Bulletin. 2004. No. 117. P. 36–42.
37. *Birkett C.M.* Contribution of the Topex NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands // Water Resour. Res. 1998. V. 34. No. 5. P. 1223–1239.
38. *Birkett C.M., Beckley B.* Investigating the performance of the Jason-2/OSTM radar altimeter over lakes and reservoirs // Marine Geodesy. 2010. V. 33. No. 1. P. 204–238.
39. *Birkett C., Reynolds C., Beckley B. et al.* From research to operations: The USDA global reservoir and lake monitor // Coastal Altimetry / Eds S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2011. P. 19–50.

40. *Cazenave A., Okal E.A.* Use of satellite altimetry in studies of the oceanic lithosphere // Space Geodesy and Geodynamic / Eds. A.J. Anderson, A. Cazenave. London: Academic Press, 1986. P. 347–375.
41. *Cazenave A., Royer J.Y.* Applications to marine geophysics // Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications / Eds. L.L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. P. 371–406.
42. *Cipollini P., Sutcliffe A.C.S., Robinson I.S.* Oceanic planetary waves and eddies: a privileged view from satellite altimetry // Oceanography from Space / Eds. V. Barale, J.F.R. Gower, L. Alberotanza. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2010. P. 195–209.
43. Coastal altimetry / Eds. S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2011. 566 p.
44. *Crétaux J-F., Jelinski W., Calmant S. et al.* SOLS: A lake database to monitor in near real time water level and storage variations from remote sensing data // Adv. Space Res. 2011. V. 47. No. 9. P. 1497–1507.
45. *Crossley D, Hinderer J, Riccardi U.* The measurement of surface gravity // Rep Prog Phys. 2013. V. 76. No. 4. 046101.
46. *Denker H., Rapp R.H.* Geodetic and oceanographic results from the analysis first year of GEOSAT data // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. No. C 8. P. 13151–13168.
47. *Douglas B.C., Agreen E.W., Sandwell D.T.* Observing global ocean circulation with SEASAT altimeter data // Marine Geodesy. 1984. V. 8. No. 1–4. P. 97–83.
48. *Douglas B.C., Cheney R.E.* GEOSAT: Beginning a new era in satellite oceanography // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. No. C3. P. 2833–2836.
49. *Fu L.-L., Le Traon P.-Y.* Satellite altimetry and ocean dynamics // Comptes Rendus Geosciences. 2006. V. 338. No. 14–15. P. 1063–1076.
50. *Heezen B., Tharp M.* World Ocean Floor panorama map. Painted by Heinrich Berann. 1977.
51. *Ilk K.H., Flury J., Rummel R. et al.* Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System, Contribution of the New Generation of Satellite Gravity and Altimetry Missions to Geosciences. Potsdam: Technische Universität München and GeoForschungsZentrum, 2004. 160 p.
52. *Koblinsky C.J., Clarke R.T., Brenner A.C. et al.* Measurement of river level variations with satellite altimetry // Water Resources Research. 1993. V. 29. No. 6. P. 1839–1848.
53. *Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lebedev S.A. et al.* Oceanic fronts in the southern Indian Ocean as inferred from the NOAA SST, TOPEX/POSEIDON and ERS-2 altimetry data // Gayana. 2004. V. 68. No. 2. P. 333–339.
54. *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.
55. *Lebedev S.A.* Interannual trends in the Southern Ocean sea surface temperature and sea level from remote sensing data // Russ. J. Earth. Sci. 2007. V. 9. No. 3. ES3003.
56. *Lebedev S.A.* Mean sea surface model of the Caspian Sea based on TOPEX/Poseidon and Jason-1 satellite altimetry data // Geodesy for Planet Earth / Eds. S. Kenyon et al., International Association of Geodesy Symposia V. 136. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg 2012, P. 833–841.

57. *Lebedev S.A., Sirota A.M.* Oceanographic investigation in the Southeastern Pacific Ocean by satellite radiometry and altimetry data // *Adv. Space Res.* 2007. V. 39. No. 1, P. 203–208.
58. *Nerem R.S., Chambers D., Choe C. et al.* Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions // *Marine Geodesy.* 2010. V. 33. No. 1. P. 435–446.
59. *Papa F., Legresy B., Mognard N.M. et al.* Estimating terrestrial snow depth with the Topex-Poseidon altimeter and radiometer // *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing,* 2002, V. 40. No. 10. P. 2162–2169.
60. *Papa F., Legresy B., Remy F.* Use of the Topex-Poseidon dual-frequency radar altimeter over land surfaces // *Rem. Sens. Environment.* 2003. V. 87. No. 2–3. P. 136–147.
61. *Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. et al.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. No. B4. B04406. 38 p.
62. *Pritchard H.D., Arthern R.J., Vaughan D.G. et al.* Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets // *Nature.* 2009. V. 461. No. 7266. P. 971–975.
63. *Rapp R.H.* Gravity anomalies and sea surface heights from a combined GEOS-3/SEASAT altimeter data set // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. No. E5. P. 4867–4876.
64. *Rapp R.H., Basic T.* Oceanwide gravity anomalies from GEOS 3, SEASAT and GEOSAT altimeter data // *Geophys. Res. Letters.* 1992. V. 19. No. 19. P. 1979–1982.
65. *Remy F., Shaeffer P., Legrésy B.* Ice flow physical processes derived from ERS-1 high-resolution map of the Antarctica and Greenland ice sheets // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 139. No. 3. P. 645–656.
66. *Rio M.H., Guinehut S., Larnicol G.* New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V 116. No. C7. C07018.
67. *Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications / Eds. L.L. Fu, A. Cazenave.* San Diego: Academic Press, 2001. 464 p.
68. *Seeber G.* *Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications / 2nd completely revised and extended edition.* Berlin, New York: Walter de Gruyter. 2003. 589 p.
69. *Sirota A.M., Lebedev S.A., Kostianoy A.G.* Oceanic currents in the southeastern Pacific Ocean as revealed by satellite altimetry data // *Gayana.* 2004. V. 68. No. 2. P. 539–542.
70. *Smith W.H.F., Sandwell D.T.* Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. No. B11. P. 21803–21824.
71. *Tapley B.D., Kim M.C.* *Applications to Geodesy // Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications /Eds. L.L. Fu, A. Cazenave.* San Diego: Academic Press, 2001. P. 371–406.
72. *Technical Considerations for Use of Geospatial Data in Sea Level Change Mapping and Assessment.* NOAA NOS Technical Report. Silver Spring, MD: NOAA NOS, 2010. 130 p.
73. *Troitskaya Y.I., Ermakov S.A.* Manifestations of the Indian Ocean tsunami of 2004 in satellite nadir-viewing radar backscatter variations // *Geophysical Research Letters.* 2006. V. 33. No. 4. L04607.

74. Troitskaya Yu., Rybushkina G., Soustova I. et al. Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir // Int. J. Rem. Sens. 2012. V. 33. No. 23. P. 7559–7578.
75. Wessel P. Global distribution of seamounts inferred from gridded Geosat/ERS-1 altimetry // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No. B9. P. 19431–19441.
76. Woodworth P.L., Cartwright D.E. Extraction of the M_2 ocean tide from SEASAT altimeter data // Geophys. J. Int. 1986. V. 84. No. 2. P. 227–255.
77. Zakharova E.A., Kouraev A.V., Crétaux J.-F. et al. Radar altimetry for studies of large river basins: Hydrological regime of the Euphrates-Tigris rivers // Proceedings of the Envisat Symposium 2007, 23–27 April 2007, Montreux, Switzerland. ESA SP-636. 6 p.

Satellite altimetry in the Earth Sciences

S.A. Lebedev^{1,2}

¹ *Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
E-mail: lebedev@wdcb.ru

² *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
E-mail: sergey_a_lebedev@mail.ru

The article is dedicated to the achievements of satellite altimetry in the geosciences. The area of application of satellite altimetry is growing. In addition to already become classical tasks of geodesy satellite altimetry data have been widely used in many earth sciences geology, oceanography, glaciology, hydrology, landscape studies, etc.

Keywords: satellite altimetry, geosciences.