

**КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И
ФОТОГРАММЕТРИЯ**

УДК 528.711.1(202)

Научный центр аэрокосмического
мониторинга «АЭРОКОСМОС»
Академик *В.Г.Бондур*
Инженер *А.Ш.Замишина*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВНУТРЕННИХ
ВОЛН НА ГРАНИЦЕ ШЕЛЬФА ПО СПЕКТРАМ
КОСМИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Введение

Внутренние волны в океане в существенной мере определяют изменчивость толщи водной среды в широких диапазонах пространственных и временных масштабов. Они могут участвовать в перераспределении потоков тепла, импульса и энергии, а при разрушении создавать мелкомасштабные колебания. В связи с этим, исследования внутренних волн, прежде всего, их возникновения, развития, распространения, а, особенно, вопросов неустойчивости и разрушения приобретают определяющее значение для понимания процессов обмена в океане. Причины возникновения внутренних волн разнообразны, они могут быть вызваны колебаниями атмосферного давления, ветра, подводными землетрясениями, обтеканием течениями неровностей дна, антропогенными воздействиями и т.п. [1, 2]. В прибрежных акваториях, как правило, наблюдаются естественные внутренние волны, образованные в результате действия приливов. Вследствие их диссипации при взаимодействии с материковым склоном могут образовываться системы короткопериодных внутренних волн [3—5].

Внутренние волны, воздействуя на поверхность, вызывают существенные изменения пространственно-временной структу-

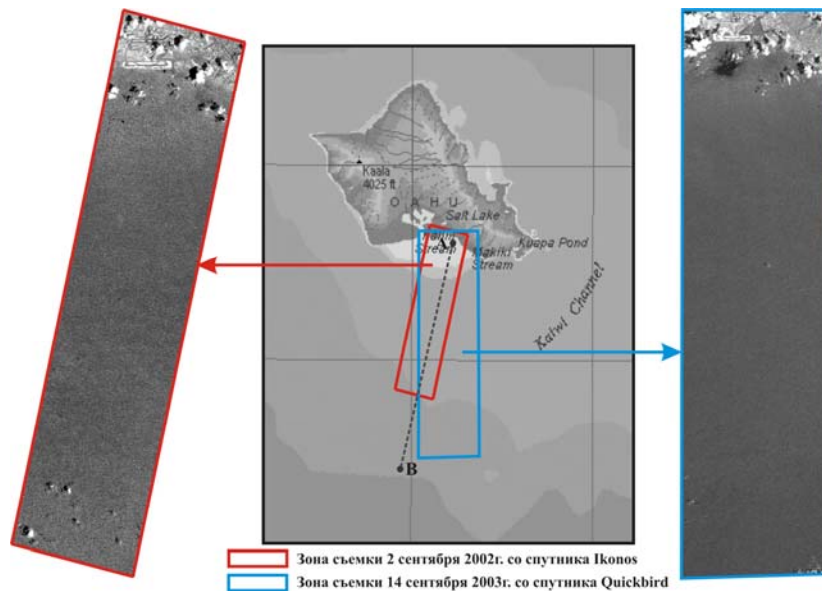


Рис.1. Карта исследуемого района и обрабатываемые космические изображения

ры волнения, которые можно наблюдать как визуально так и при помощи дистанционной аппаратуры [3—6].

Для проведения мониторинга морских акваторий и проявлений внутренних волн целесообразно использовать космические средства дистанционного зондирования, которые обеспечивают глобальность, регулярность и оперативность наблюдений, а также достоверность получаемых данных [3]. При этом для изучения поверхностных проявлений внутренних волн наиболее эффективным является спектральный подход, позволяющий описывать случайную пространственную структуру поверхностного волнения, выявлять его изменчивость под действием различных факторов, а также исследовать физику происходящих процессов и явления [3].

В настоящей работе исследуются спектральные характеристики естественных высокочастотных внутренних волн образующихся в зоне материкового склона при набегании приливного потока

Район проведения исследований

Исследование поверхностных проявлений внутренних волн проводилось в акватории бухты Мамала о. Оаху (Гавайский

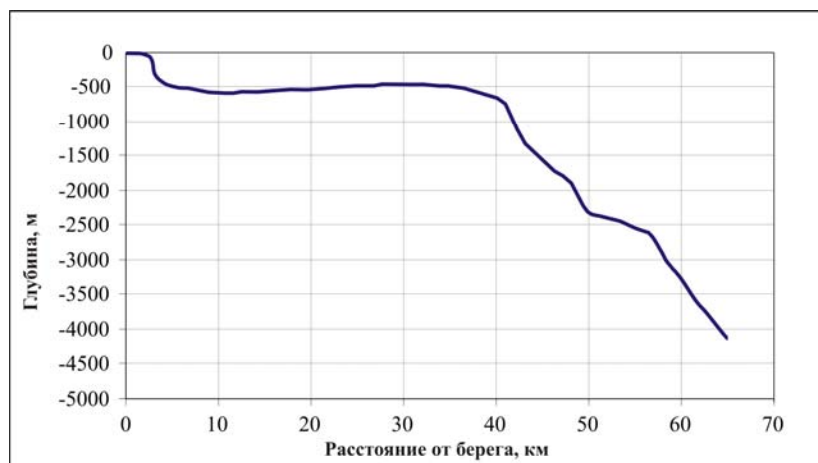


Рис. 2. Профиль дна вдоль линии *AB* (см. рис. 1) в исследуемой акватории

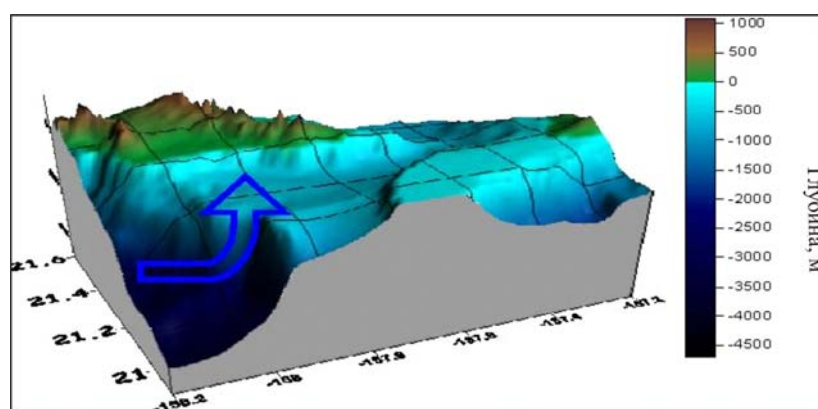


Рис. 3. Набегание приливного потока на материковый склон в районе о. Оаху

архипелаг) [6, 7]. На рис. 1 (в центре) представлена карта исследуемого района Тихого океана с обозначенными зонами космических съемок. Профиль дна исследуемого участка вдоль линии *AB* (см рис. 1) приведен на рис. 2. Как видно из рис. 2, после 50-метровой глубины на шельфе в исследуемом районе имеется резкий свал до глубины 500 м, а после некоторого продолжительного пологого участка на материковом склоне (далее 40 км от берега) глубины резко изменяются с 600 до 4500 м.

Большой Гавайский подводный хребет является источником интенсивных внутренних волн, распространяющихся на большие расстояния в океане [7—10]. В исследуемом районе материковый склон, поднимаясь с больших глубин почти до поверхности океана, создает резкую неоднородность для распространения баротропной приливной волны. Приливные течения, встречая на своем пути неровности топографии дна, получают вертикальные составляющие (рис. 3). В результате этого происходит периодическое смещение изопикнических поверхностей, что вызывает внутренние волны приливного периода [8—10]. Внутренние приливы генерируются у Гавайев не у бровки шельфа, как обычно, а на значительной глубине крутого материкового склона, где наклон последнего становится критическим для условий средней стратификации [8,9]. Периодическое смещение пикноклина вверх и вниз относительно среднего положения приводит к образованию прогрессивных внутренних волн, которые распространяются в обе стороны от склона, а фронт внутренних волн оказывается примерно параллелен континентальному склону [9, 10]. Генерация внутренних волн на материковом склоне значительно изменяется от места к месту в зависимости от наклона дна, величины приливного потока и плотностной стратификации воды.

Внутренние волны больших амплитуд, генерируемые глубинной частью Гавайского хребта, распространяются в океан от подводных склонов, а их более слабая затухающая компонента направлена к берегу и в стадии распада может порождать высокочастотные внутренние волны [10]. Одним из интересных мест исследования проявлений таких внутренних волн является район резкого свала глубин.

Особенности космических изображений и методики их обработки

При выполнении международного проекта [6, 7] в 2002—2004 гг. проводилась съемка прибрежной акватории бухты Мамала с борта различных космических аппаратов, в том числе со спутников Ikonos и Quickbird, оборудованных оптической аппаратурой высокого пространственного разрешения [6].

На рис. 1 в качестве примеров представлены зоны съемок и сами космические изображения, полученные 2 сентября

2002 г. спутником Ikonos и 14 сентября 2003 г. спутником Quickbird. Обе зоны съемок вытянуты по долготе и имеют размеры $\sim 11 \times 50 \text{ км}^2$ и $\sim 16 \times 70 \text{ км}^2$ соответственно. Космические изображения, полученные в пределах этих зон, позволяют исследовать поверхностные проявления внутренних волн на значительном расстоянии от берега, в том числе, в зоне резкого свала глубин, расположенного в $\sim 30\text{—}40 \text{ км}$ от берега (см. рис. 1, 2). Здесь глубина на участке протяженностью $\sim 20 \text{ км}$ изменяется на 4000 м (см. рис. 2).

Методика обработки космических изображений с целью исследования спектральных характеристик внутренних волн включала следующие этапы [3]:

1. Разбиение исходных изображений на фрагменты, в нашем случае, размером $2048 * 2048$ пикс.
2. Формирование двумерных пространственных спектров фрагментов космических изображений путем выполнения быстрого преобразования Фурье.
3. Обработку полученных спектров с целью улучшения их качества, подразумевающую такие процедуры, как: эквализация, цветовое кодирование, сглаживающая фильтрация и др.
4. Выделение по сформированным двумерным спектрам фрагментов космических изображений спектральных максимумов, соответствующих системам внутренних и поверхностных волн.
5. Определение характеристик выделенных спектральных максимумов таких, как: пространственная частота, длина волны, ширина и ориентация максимумов.
6. Статистический анализ полученных характеристик спектральных максимумов с целью определения систем внутренних волн и исследования их характеристик.
7. Привлечение дополнительных гидрометеорологических данных для отделения поверхностного, в том числе, ветрового волнения, от внутренних волн.
8. Выделение зон поверхностных проявлений внутренних волн.

При проведении обработки аккумуляровались фрагменты космических изображений размером $2048 * 2048$ пикселей, что соответствовало размерам участков на поверхности океана

$\sim 1,3 \times 1,3 \text{ км}^2$ (для изображений, полученных со спутника Quickbird) и $\sim 2 \times 2 \text{ км}^2$ (для изображений, полученных со спутника Ikonos).

Результаты спектральной обработки космических изображений и их анализ

Визуальный анализ космических изображений высокого пространственного разрешения, приведенных в качестве примеров на рис. 1, не позволил выявить в данном районе поверхностные проявления внутренних волн, которые часто наблюдаются на космических изображениях других прибрежных зон океана [3, 4,5].

На рис. 4 в качестве примера приведены результаты пространственной спектральной обработки космических изображений, полученных 2 сентября 2002 г. со спутника Ikonos и 14 сентября 2003 г. со спутника Quickbird, а также представлены спектры нескольких фрагментов, соответствующих различным участкам анализируемых изображений.

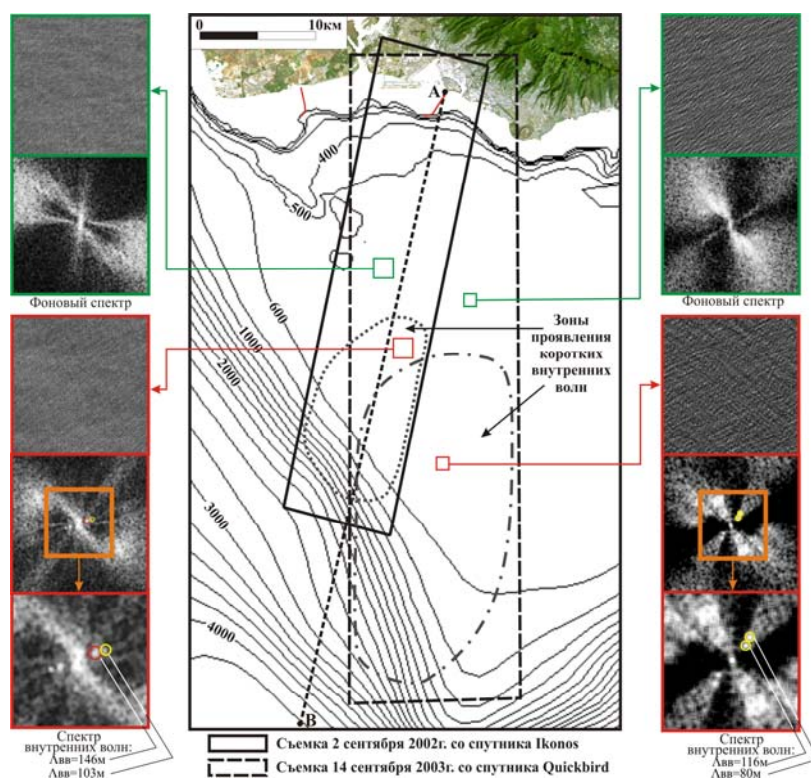


Рис. 4. Фрагмент карты исследуемой акватории в районе о.Оаху (Гавайи) и результаты спектральной обработки фрагментов космических изображений

В центральных частях приведенных спектров фрагментов изображений, расположенных вблизи резкого свала глубин (см. рис. 4), четко видны локальные максимумы, соответствующие высокочастотным внутренним волнам [3, 6]. Длины этих волн составляют 103 и 146 м для изображения, полученного в 2002 г., и 80 и 116 м для изображения, полученного в 2003 г. Аналогичные максимумы были обнаружены и в спектрах других фрагментов, соответствующих нижней части космических изображений, в зонах, близких к свалу глубин. В фоновых спектрах, взятых ближе к берегу, такие гармоники отсутствуют (см. рис. 4, вверху).

Для анализа выделенных спектральных максимумов были рассчитаны различные характеристики, такие как: пространственная частота (ν), длина волны (λ) и ориентация гармоник (θ). После чего была произведена статистическая обработка этих характеристик, результаты которой приведены на рис. 5, 6. Эти результаты получены по спектрам фрагментов изображения, полученного 14 сентября 2003 г.

Из гистограммы, представленной на рис. 5, видно, что выделенные спектральные гармоники делятся по длинам волн на 2 класса. Первый класс характеризуется длинами $\lambda \sim 30\text{—}60$ м и соответствует ветровым волнам для наблюдаемых в этот период времени скоростей ветра ($W/B = 6\text{—}8$ м/с). Второму классу спектральных максимумов соответствуют длины волн $\lambda \sim 80\text{—}150$ м. Эти максимумы вызваны поверхностными проявлениями высокочастотных внутренних волн.

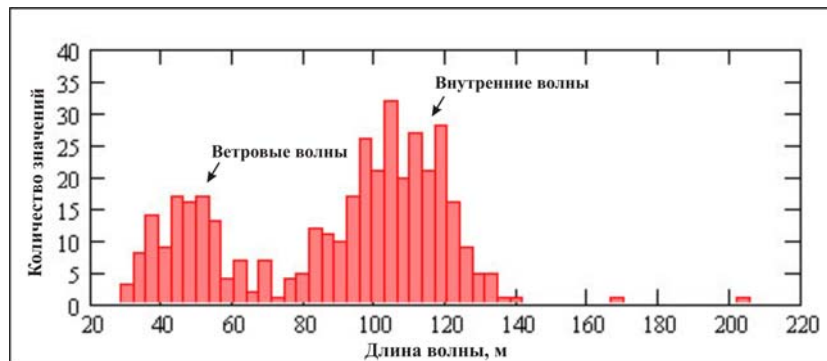


Рис. 5. Распределение значений длин волн, зарегистрированных по спектрам космических изображений

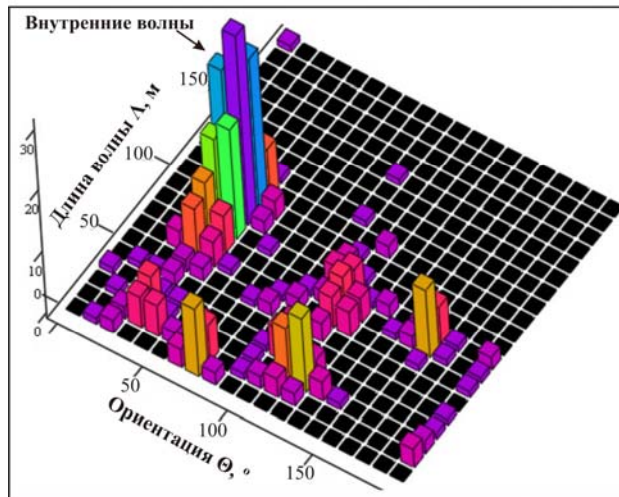


Рис.6.Трехмерное распределение характеристик спектральных максимумов в пространстве Л-О

Для более детального анализа было построено распределение длин волн λ и ориентаций выделенных спектральных гармоник θ , соответствующих всем фрагментам космических изображений для нижней части зоны съемки. На рис. 6 четко выделяется кластер, соответствующий длинам волн $\lambda \sim 80-200$ м и направлениям распространения $\theta \sim 30-60^\circ$ (практически ортогонально по отношению к изобатам). Подобные результаты получены и при обработке космического изображений, полученного со спутника Ikonos 2 сентября 2002г.

Таким образом, проведенная пространственная спектральная обработка космических изображений, полученных со спутников высокого разрешения Ikonos и Quickbird, позволила установить, что в области свала глубин и прилегающей к нему пологой части материкового склона выделяются системы короткопериодных внутренних волн, характеризующихся длинами $\lambda \sim 80-200$ м и направлением распространения $\theta \sim 30-60^\circ$. Важно отметить, что эти внутренние волны не выделяются при визуальном анализе полученных космических изображений. Области проявления таких коротких внутренних волн, выделенных по спектрам космических изображений, представлены на рис. 4. При анализе рис. 4 установлено, что поверхностная аномалия, связанная с проявлением приливных внутренних волн, занимает область, вытянутую в направлении юго - запад – северо - восток

(ортогонально свалу глубин). Это обусловлено особенностью полей приливных течений и характеристиками дна.

Аналогичные результаты получены при обработке и других космических изображений, полученных в 2002-2004 гг.

Исходя из вышеизложенного, можно дать следующее объяснение наблюдаемого явления. Из открытой части океана на материковый склон набегают длинные приливные баротропная волна. Встречая на своем пути препятствие, приливные течения получают вертикальные составляющие, которые вызывают колебания изопикнических поверхностей и, следовательно, образование внутренних волн.

Для волны, распространяющейся в сторону шельфа, возникает эффект постоянной подкачки энергии, который может приводить к интенсификации волн [4,9,10]. В определенный момент рост энергии волны приводит к критическим условиям, что вызывает обрушение волны и передачу энергии пакету короткопериодных внутренних волн [4,8]. То есть происходит диссипация энергии длинной приливной волны, за счет чего образуется система более коротких волн, которая и была выделена по спектрам космических изображений. Породившую их длинную приливную волну сложно зафиксировать по космическим изображениям высокого разрешения. Размеры обрабатываемых фрагментов составляли $\sim 1,3 \times 1,3$ км² (для изображений со спутника Quickbird) и $\sim 2 \times 2$ км² (для изображений со спутника Ikonos), в то время как длина приливной волны полусуточного периода составляет несколько километров [4,9].

Для образования такой системы волн, необходимо, чтобы прилив распространялся ортогонально свалу глубин. Для подтверждения данной гипотезы были привлечены модельные данные о направлении распространения прилива в данном районе. На рис. 7 представлено положение изотерм в заданном районе в последовательные моменты времени, полученное по результатам математического моделирования циркуляций водных масс в районе Гавайских островов [11]. Положение изотерм в разные моменты времени дает представление о направлении движения прилива. Анализ рис.3 и 7 показывает, что прилив распространяется практически ортогонально свалу глубин. Следовательно, в этом месте могут наблюдаться эффекты, свя-

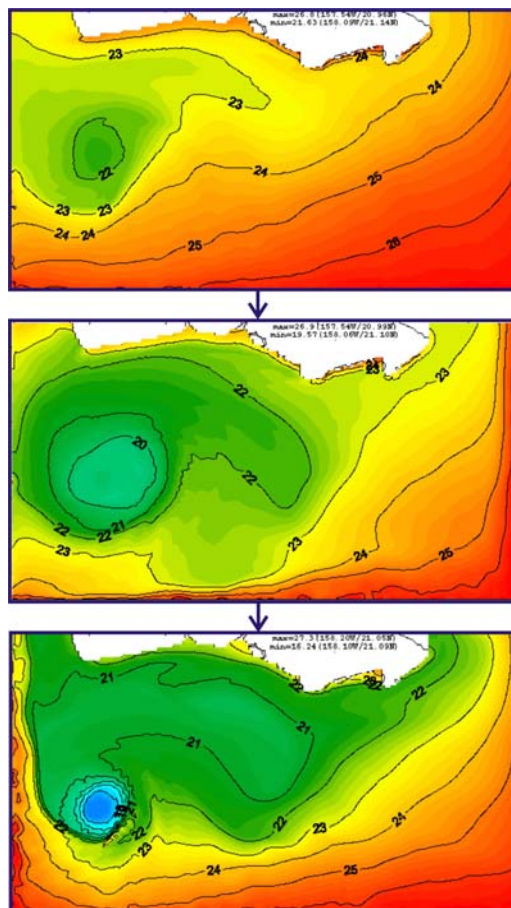


Рис. 7. Положение изотерм в исследуемой акватории в разные моменты времени

занные с распадом длинной приливной волны на короткие внутренние волны, которые и были выявлены по космическим изображениям высокого разрешения при их пространственном спектральном анализе.

Заключение

В результате пространственной спектральной обработки оптических космических изображений высокого разрешения и статистического анализа характеристик выделенных спектральных максимумов, соответствующих поверхностным проявлениям внутренних волн в прибрежной зоне океана у о. Оаху (Гавайи), можно сделать следующие выводы:

1. На участке, соответствующем свалу глубин и прилегающей к нему пологой части материкового склона (на расстоянии 20—50 км от берега), проявляются системы высокочастотных внутренних волн, образованных в результате распада длинной приливной волны. Эти короткие внутренние волны распространяются практически ортогонально изобатам (направление ~30—60°), соответствующим свалу глубин в исследуемой акватории, и имеют длины от 80 до 200 м.

2. Такие высокочастотные внутренние волны не обнаруживаются визуально на космических изображениях, а выявляются только по спектральным гармоникам двумерных пространственных спектров фрагментов этих изображений.

3. Поверхностная аномалия, связанная с проявлением приливных внутренних волн, в исследуемой акватории бухты Мамала занимает область размером ~400 км², вытянутую в направлении юго-запад — северо-восток (ортогонально свалу глубин).

ЛИТЕРАТУРА

1 Гидродинамика океана / Физика океана т. 2 / Под редакцией Мони-на А. С. — М.: Наука, 1978 — 455 с.

2 К о н я е в К. В., С а б и н и н К. Д. Волны внутри океана — СПб.: Гидрометеоздат, 1992. — 273 с.

3 Бондур В. Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии / Новые идеи в океанологии / Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова Т1: Физика. Химия. Биология. М.: Наука. 2004. С. 55—117 +8с. цв. вклеек.

4 Бондур В. Г., Морозов Е. Г. Бельчанский Г. И., Гребенюк Ю. В. Радиолокационная съемка и численное моделирование внутренних приливных волн в шельфовой зоне // Исследование Земли из космоса. — 2006. — № 2. — С. 51—63.

5 An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties / Editor Christopher R. Jackson. Alexandria Global Ocean Associates, 2004, 560 p.

6 Бондур В.Г. Комплексный космический мониторинг прибрежных акваторий / 31-й Международный симпозиум в области дистанционного зондирования окружающей среды СПб., 2005.

7 B o n d u r V. , F i l a t o v N. Study of physical processes in coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing // Proceedings of the 7-th Workshop on Physical Processes in Natural Waters, 2—5 July 2003 Petrozavodsk, Russia.

8 Alford M. H. , M. Gregg, and M.A. Merrifield Structure, Propagation, and Mixing of Energetic Baroclinic Tides in Mamala Bay, Oahu, Hawaii // Physical Oceanography. — 2005. v. 110.

9 Merrifield, M.A. , and P. E. Holloway (2002) Model estimates of M2 internal tide energetics at the Hawaiian Ridge, J. Geophys. Res., 107(C8), 3179, doi: 10.1029/2001JC000996.

10 Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология, — 2007. — № 6.

11 Бондур В.Г., Ибраев Р.А., Гребенюк Ю.В., Саркисян А.С. Моделирование полей течений в открытых акваториях океана на примере района Гавайских островов // Физика атмосферы и океана. — 2007. — № 6. — С. 1 — 16.