

Опыт картирования характеристик уровня северо-западной части Тихого океана на основе спутниковой информации

Т. В. Белоненко, В. Р. Фукс¹

Санкт-Петербургский государственный университет

В 2011 году был издан «Атлас изменчивости уровня северо-западной части Тихого океана», который является коллективным трудом сотрудников лаборатории региональной океанологии факультета географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета и завершает цикл исследований, относящихся к использованию спутниковой альтиметрической информации для изучения межгодовой, сезонной и синоптической изменчивости уровня в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей. Информационной основой для составления карт Атласа являлись мареографные измерения уровня моря на береговых станциях и постах и спутниковая альтиметрия северо-западной части Тихого океана (спутники GEOSAT, ERS-1, TOPEX/Poseidon, ERS-2, GFO-1, Jason-1, Envisat, OSTM/Jason-2).

Авторы дают представительное описание изменчивости уровня в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей. Это достигается путем расчета и картирования полей разнообразных характеристик колебаний уровня океана: статистических показателей (математическое ожидание, тренды, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации), а также полей геострофических течений и дивергенции полных потоков – с различными масштабами осреднения (многолетнее, годовое и месячное осреднение).

На основе гармонического, спектрального и вейвлет-анализа дано описание сезонной изменчивости годовых и полугодовых колебаний уровня моря. В узлах регулярной сетки с шагом $1/3$ градуса широты и долготы выделены годовые и полугодовые колебания уровня моря, картированы их амплитуды и фазы. По результатам гармонического анализа колебаний уровня и приливных течений на основе реализации приливной гидродинамической модели рассчитаны гармонические постоянные и построены котидальные карты и карты амплитуд волн приливов M_2 , S_2 , K_2 , N_2 , K_1 , O_1 , Q_1 , P_1 ; котидальные карты и карты амплитуд долгопериодных приливов M_f и M_m , карты приливных колебаний $(H_{K1}-H_{O1})/H_{M2}$. Для главных волн прилива построены карты скорости, фазы и направления максимальных приливных течений.

Ключевые слова: атлас, уровень моря, альтиметрия, Тихий океан

Experience of mapping Sea-Surface Level Variability in the Northwestern Pacific based on satellite data. Tatiana V. Belonenko, Victor R. Foux. Saint-

Petersburg State University. btvlisab@yandex.ru

Atlas «Sea-Surface Level Variability in the Northwestern Pacific» was published in 2011 and was a collective work exercised by a team of scientists in the Regional Oceanology Laboratory with the Geography and Geoecology Faculty of St.-Petersburg State University. This publication finalizes a body of research in using satellite altimetry data to study sea-surface level variability in the Northwestern Pacific ocean and Far-Eastern seas on multiyear, seasonal, and synoptic scales. Informational base for maps in the Atlas was the gauge sea-level measurements at coastal stations and the satellite altimetry over the northwestern Pacific Ocean (satellites

¹ Белоненко Татьяна Васильевна, к.геогр.н.; Фукс Виктор Робертович, д.геогр.н., лаборатория региональной океанологии факультета географии и геоэкологии СПбГУ.



GEOSAT, ERS-1, TOPEX/Poseidon, ERS-2, GFO-1, Jason-1, Envisat and OSTM/Jason-2).

A comprehensive description of the sea-surface level variability in the North-western Pacific and Far-Eastern seas is produced by the authors with calculations and mapping the fields of various statistical characteristics of the sea level – expectation, trend, root mean square deviation and coefficient of variation, as well tracing the fields of geostrophic currents and full flow divergences at different scales of averaging (multi-year, year, and month).

Description of annual and semi-annual sea-level changes is based on harmonic, spectral and wavelet analyses. The 1-year and 1/2-year sea-level variations are revealed, and their amplitudes and phases are mapped in nodes of regular $1/3 \times 1/3$ grad net of latitude and longitude. Results of the harmonic analysis of sea level fluctuations and tidal currents are used in a hydrodynamic model to estimate harmonic constants and to draw up cotidal maps and amplitude maps for tidal waves M_2 , S_2 , K_2 , N_2 , K_1 , O_1 , Q_1 and P_1 ; cotidal maps and amplitude maps for long-term tides M_f and M_m ; and maps of the tide characteristic $(H_{K1}-H_{O1})/H_{M2}$. For principal tidal waves, maps of the speed, phase and direction of maximal tidal currents are presented.

Keywords: atlas, sea level, altimetry, Pacific ocean

2

Введение

Спутниковые методы получения информации об океане привели к существенным изменениям в современной океанологии. Дистанционное зондирование океана позволяет производить регулярные измерения с высоким пространственным разрешением. Точность дистанционных измерений вполне соответствует требованиям океанологической практики. В силу этого дистанционное зондирование из космоса рассматривается сейчас как основной источник непрерывно поступающей информации о Мировом океане. Развитие передовых космических технологий позволяет оперативно осуществлять сбор данных об изменчивости океанологических полей.

Практическое значение спутниковой информации связано с существенной экономией трудозатрат – материальных, финансовых и временных ресурсов на получение данных об океанологических характеристиках, как в региональном, так и в глобальном масштабах. В области океанологии стоит важнейшая стратегическая задача – освоения, разработки и внедрения новых спутниковых методов исследования океана. Бурное развитие этих методов и громадный поток информации о состоянии морей и океанов требует также и развития методов усвоения и интерпретации этой информации в целях обеспечения мореплавания, рыболовства, экологической безопасности, гидротехнического строительства и добычи минеральных ресурсов.

Об информации космического мониторинга

Объёмы информации, получаемой с искусственных спутников Земли, колоссальны, поэтому значительно возрос интерес к вопросам сбора, обработки, анализа этой информации, а также возникает все расширяющиеся возможности практического использования этих данных. Однако методы обработки, обобщения и интерпретации спутниковой информации остаются недостаточно развитыми.



Опыт картирования характеристик уровня
северо-западной части Тихого океана
на основе спутниковой информации

В 2011 г сотрудниками кафедры океанологии и лаборатории региональной океанологии Санкт-Петербургского государственного университета издан «Атлас изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана»¹. Колебания уровня моря постоянно привлекают внимание исследователей, их анализу посвящена обширная литература (см. обзор в «Атласе...»).

Колебания уровня океана представляют собой сумму эвстатических, динамических, стерических составляющих и колебаний уровня, связанных с изменениями водного баланса. К эвстатической компоненте относятся составляющие, вызываемые изменением объема океанических впадин за счет тектонических процессов. Характерное время таких изменений составляют геологические эпохи. Динамические изменения уровня вызываются прежде всего пространственными неоднородностями полей течений. Стерические колебания обусловлены изменениями плотности морской воды за счет соответствующих изменений ее температуры и солёности. Изменения водного и ледового балансов происходят вследствие образования и таяния покровных (в том числе шельфовых) ледников, а также испарения, осадков, стока материковых вод и т.д.

Существуют два принципиально различных метода наблюдений за морским уровнем: во-первых, береговые футшточные или мареографные измерения уровня, по которым имеются длительные ряды наблюдений, именно на этих материалах основаны современные представления о его изменчивости, и, во-вторых, спутниковая альтиметрия. Наблюдения на мареографных станциях имеют значительно большую продолжительность, чем ряды альтиметрических наблюдений, чья история начинается с запуска спутника Torex/Poseidon в 1992 году. В «Атласе...» мы использовали данные наблюдений за уровнем на мареографных постах северной части Тихого океана и альтиметрические данные спутников GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), TOPEX/Poseidon (1992), ERS-2 (1995), GFO-1 (GEOSAT Follow On) (1998), Jason-1 (2001), Envisat (2002), OSTM/Jason-2 (2008)².

Центр уровня моря Гавайского университета (UHSLC) предоставляет свободный доступ к архиву данных наблюдений за уровнем на мареографных станциях. Данные среднемесячных, среднесуточных и ежекратных измерений уровня моря на береговых станциях северной части Тихого океана опубликованы и постоянно пополняются на Интернет-сайте: <http://ilikai.soest.hawaii.edu>. Архив данных JASL собирает ежекратные данные от региональных и национальных сетей наблюдения за уровнем моря. Данные проверяются и исправляются очевидные ошибки, такие, как выбросы и сдвиги во времени. Продолжительность рядов в разных пунктах различна, некоторые ряды имеют значительные пропуски, связанные с различного рода причинами. Пропуски, не превышающие 25 часов, интерполируются. Количество более продолжительных пропусков можно узнать из показателя

¹ Полная ссылка: Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Колдунов В.В., Май Р.И., Рубченя А.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р. Атлас изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана. Санкт-Петербург. Издательство СМИО-ПРЕСС. 2011. 304 с.

² В скобках указан год запуска спутника.



полноты ряда (Completeness index - CI), представляющего собой процентное соотношение количества имеющихся данных к общей длине ряда, включающего в себя и пропуски. Массив используемых в «Атласе...» данных включает в себя среднемесячные значения уровня моря, измеренные на 130 береговых постах JASL с продолжительностью наблюдений до 100 лет.

Принципиально новые, уникальные возможности исследований полей уровня Мирового океана в широком диапазоне пространственно-временных масштабов открыло развитие спутниковой альтиметрии. Альтиметрия даёт почти глобальное покрытие (66°S–66°N широты) и высокую точность измерений. Для уточнения альтиметрических данных широко используются измерения уровня моря на береговых станциях. Сравнение мареографных и альтиметрических измерений проводилось для разных спутников и показало, что они достаточно хорошо согласуются друг с другом, как в глобальном масштабе (см. обзор работ по этому вопросу в «Атласе»).

Альтиметры обеспечивают измерения вдоль подспутниковых треков с временной дискретностью в 1 секунду, что, исходя из средней скорости полёта спутника, соответствует пространственной дискретности измерений примерно в 7 км. Тем не менее пространственное разрешение этих измерений для Земного шара ограничивается близостью треков друг к другу, а промежуток времени между измерениями в одной и той же точке зависит от цикла повторяемости треков спутника. Так, например, повторяемость треков TOPEX/Poseidon составляет 9,9156 суток, а расстояния между треками на экваторе – 310 км. Для спутников ERS1/2 эти показатели 35 суток и 80 км, а для GEOSAT и GFO – 17 суток и 165 км соответственно, то есть чем короче цикл повторяемости треков, тем меньше пространственное разрешение измерений.

Построение Атласа изменчивости уровня океана

Используемый в «Атласе...» массив альтиметрической информации был получен из банка данных AVISO¹ (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) проекта DUACS (Data Unification and Altimeter Combination System), который является частью сегмента обработки данных мультимиссионной спутниковой альтиметрии (SSALTO), реализуемый Французским Космическим Агентством (CNES). Система обрабатывает данные спутников Jason-1/2, TOPEX/Poseidon, Envisat, GFO-1, ERS1/2, GEOSAT и предоставляет их пользователю в двух видах: вдольтрековые данные, полученные в хронологической последовательности по измерениям отдельных спутников, и данные в узлах регулярной сетки. Этот массив, объединяющий измерения со всех вышеперечисленных спутников, представляет собой однородный по времени и по пространству набор данных о возвышениях уровня моря. В AVISO доступны два вида пространственного разрешения сетки: высокое разрешение (1/3°x1/3°, сетки Меркатора) и низкое

¹ <http://www.aviso.oceanobs.com/>



Опыт картирования характеристик уровня
северо-западной части Тихого океана
на основе спутниковой информации

разрешение ($1^\circ \times 1^\circ$, сетки Меркатора). Также доступны данные в декартовой сетке $1/4^\circ \times 1/4^\circ$. Процесс генерации данных состоит из 4 шагов: анализ данных повторяемых треков, перекрёстная проверка, фильтрация и генерация исходных альтиметрических массивов, причем каждый из шагов представляет задачу, требующую больших вычислительных затрат. Процедура пересчёта вдольтрековых измерений в узлы регулярной сетки основана на комбинировании данных с разных спутников методом оптимальной интерполяции с реалистичными корреляционными функциями (см. обзор в «Атласе...»).

В «Атласе...» анализируются два типа данных: абсолютная динамическая топография **ADT** (Absolute Dynamic Topography) и относительная динамическая топография **SLA** (Sea Level Anomaly) – аномалии уровня моря. Абсолютная динамическая топография (**ADT**) характеризует отклонение высоты морской поверхности от геоида (за поверхность геоида принимается геопотенциальная поверхность океана), а относительная динамическая топография (**SLA**) – это отклонение высоты поверхности моря от средних ее значений, полученных осреднением за несколько лет (1993–1999)¹.

На рисунке 1 и 2 представлены примеры таких карт.

Точное представление абсолютной динамической топографии до сих пор остаётся сложной задачей, что связано с существующими проблемами определения высоты геоида. Одним из путей решения этой проблемы является оценка, наряду с **SLA**, средней динамической топографии (Mean Dynamic Topography – **MDT**), которая может быть оценена различными методами. В **AVISO** в качестве **MDT** используется модель **Rio05**, соответствующие ссылки даны в «Атласе...».

Сегодня спутниковые альтиметрические измерения высоты морской поверхности при точности 2-3 см дают пространственное вдольтрековое разрешение 5-7 км с периодичностью 3-35 суток. Подробное описание возможностей спутниковой альтиметрии, процедуры получения данных и их обработки, включая поправки на влияние атмосферы, ионосферы и на состояние подстилающей поверхности с дальнейшей корректировкой данных выходит за рамки «Атласа...». В отечественной литературе эти вопросы очень хорошо изложены С. А. Лебедевым, А. Г. Костяным [9]. Использование спутниковой альтиметрии в океанологических исследованиях привело к значительному прогрессу в наших знаниях о динамике океана в различных регионах Мирового океана.

В «Атласе...» карты сопровождаются пояснениями, содержащими указания на источник информации о картируемой характеристике, алгоритмам преобразования этой информации и короткую интерпретацию содержания карты. Необходимые дополнения можно получить, используя соответ-

¹ Средние значения высоты морской поверхности, полученные осреднением за несколько лет (1993-1999), хранятся в массиве **MSSH** (Mean Sea Surface Height) и вычисляются по формуле: $SLA = SSH - MSSH$



ствующие библиографические ссылки, включая авторские публикации по этим проблемам.

Издание «Атласа изменчивости уровня северо-западной части Тихого океана» завершает этап целого ряда исследований, относящихся к использованию спутниковой альтиметрической информации для изучения межгодовой, сезонной и синоптической изменчивости уровня в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей (гранты РФФИ № 96-05-65157, 98-05-64468, 04-05-64876). Руководитель всех этих проектов – доктор географических наук, профессор Виктор Робертович Фукс.

Все необходимые расчеты для построения карт «Атласа...» выполнены Р. И. Маем. Большинство карт построены А. В. Колдуновым и Р. И. Маем и с использованием программы GMT [10].

Теоретические основы разработки «Атласа изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана» подробно изложены в монографии авторов [1], а также [2–8]:

2

«Атлас изменчивости уровня Тихого океана»

Атлас содержит не только картированную информацию рассчитываемых характеристик, но и ее анализ. Картировалась и анализировалась следующая информация:

1. *Гидрографическое описание района. Вдольтрековые спутниковые измерения.*
 - 1.1. *Батиметрическая карта района.*
 - 1.2. *Основные спутниковые треки.*
 - 1.3. *Вдольтрековые изоплеты уровня моря.*
2. *Динамическая топография поверхности моря (осреднение за 1992 – 2007 гг.)*
 - 2.1. *Математическое ожидание абсолютной динамической топографии поверхности моря.*
 - 2.2. *Среднеквадратическое отклонение от среднемноголетних значений абсолютной динамической топографии поверхности моря.*
 - 2.3. *Коэффициент вариации среднемноголетних значений абсолютной динамической топографии поверхности моря.*
 - 2.4. *Среднемноголетняя дивергенция полных потоков.*
3. *Динамическая топография поверхности (годовое осреднение).*
 - 3.1. *Уровень моря на мареографных постах с годовым осреднением.*
 - 3.2. *Среднегодовая топография поверхности океана.*
 - 3.3. *Тренды в уровне моря.*
 - 3.3.1. *Тренды уровня моря в реперных мареографных пунктах.*
 - 3.3.2. *Тренды уровня моря по данным спутниковых альтиметрических измерений.*
 - 3.4. *Среднеквадратическое отклонение динамической топографии при годовом осреднении.*
 - 3.5. *Среднегодовая дивергенция полных потоков.*
4. *Месячное осреднение динамической топографии поверхности моря.*
 - 4.1. *Среднемесячный уровень моря на мареографных постах.*
 - 4.1.1. *Среднемноголетний сезонный ход уровня моря.*
 - 4.1.2. *Спектральный и вейвлет-анализ колебаний уровня на мареографных постах.*
 - 4.1.3. *Вейвлет-изображения динамической топографии поверхности моря в отдельных пунктах региона.*
 - 4.2. *Среднемноголетние месячные значения абсолютной динамической топографии поверхности моря.*
 - 4.3. *Среднеквадратическое отклонение среднемноголетних месячных значений динамической топографии поверхности моря.*



Опыт картирования характеристик уровня
северо-западной части Тихого океана
на основе спутниковой информации

- 4.4. *Сезонные изменения дивергенции полных потоков.*
5. *Годовые и полугодовые колебания уровня.*
 - 5.1. *Амплитуды годовой и полугодовой гармоник в отдельных мареографных пунктах.*
 - 5.2. *Изменчивость амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник по альтиметрическим данным.*
 - 5.3. *Изоплеты вейвлет-коэффициентов для годовых и полугодовых составляющих колебаний уровня океана на меридиональном и широтном разрезе.*
6. *Геострофические течения.*
 - 6.1. *Среднемноголетние течения, рассчитанные по абсолютной динамической топографии поверхности моря.*
 - 6.2. *Среднемноголетние геострофические течения, рассчитанные по относительной динамической топографии поверхности моря.*
 - 6.3. *Среднегодовые течения, рассчитанные по абсолютной динамической топографии поверхности моря.*
 - 6.4. *Среднегодовые течения, рассчитанные по относительной динамической топографии поверхности моря.*
 - 6.5. *Среднемесячные течения, рассчитанные по абсолютной динамической топографии поверхности моря.*
 - 6.6. *Среднемесячные течения, рассчитанные по относительной динамической топографии поверхности моря.*
7. *Приливные колебания уровня моря.*
8. *Приливные течения.*

Одной из картируемых характеристик являлись значения дивергенции полных потоков, рассчитанной по скорости изменения уровня $\partial\xi/\partial t$. Для интересующих нас масштабов времени, пренебрегая пресным балансом, из уравнения неразрывности массы, проинтегрированного от поверхности моря до дна $z = H(x, y)$, получим

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} = -\operatorname{div}\bar{V}H - \int_0^H \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} dz,$$

где \bar{V} – средняя по вертикали скорость течения, H – глубина моря, $\bar{V}H$ имеет смысл полного потока (Фукс, 2003).

Первое слагаемое в правой части этого уравнения имеет смысл скорости за счет динамического изменения уровня, а второе слагаемое характеризует скорость стерического изменения уровня моря.

В условиях, когда стерические эффекты малы,

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} = -\operatorname{div}\bar{V}H.$$

Если дивергенция полного потока положительна, происходит понижение уровня моря, когда она отрицательна, уровень повышается.

Для постоянной глубины уравнение неразрывности этой системы можно записать в виде

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} = -H \cdot \operatorname{div}\bar{V},$$

где $\operatorname{div}\bar{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ – дивергенция скорости течения \vec{V} , а \bar{V} – проинтегрированный по глубине средний по вертикали вектор скорости течения.



При дивергенции полных потоков ($\text{div} \vec{V} H > 0$) уровень моря понижается, и формируется зона, в которой происходит опускание вод на глубину (даунвеллинг). При конвергенции полных потоков ($\text{div} \vec{V} H < 0$) уровень моря повышается, и формируется зона, где происходит подъем к поверхности вод с глубины (апвеллинг).

На рис. 3 представлена карта среднесезонной дивергенции полных потоков за 1992–2007 гг. Можно считать, что при таком масштабе осреднения стерические эффекты, которые имеют преимущественно сезонный ход, будут подавлены. Анализ его приводит к выводу, что дивергенция и конвергенция уровня достигают своих экстремальных значений в зоне основных течений геострофической циркуляции данного региона, прежде всего в стрежне Куроисио и его рингов, а также Курильском течении, течении Ойясио и Алеутском течении. На карте области дивергенции (понижение уровня) в зоне Куроисио расположены преимущественно южнее 35° с.ш., в то время как области конвергенции (рост уровня) расположены большей частью на 35 -й параллели либо севернее ее. Абсолютные значения экстремумов уменьшаются в восточном направлении в соответствии с тенденцией к ослаблению потока Куроисио и становятся практически незначимыми восточнее 175° з.д. Северо-восточная ветвь Куроисио выражена слабо. Выделяются обширные области повышенных значений дивергенции и конвергенции в районе Алеутского течения, причем области конвергенции примыкают к Алеутской гряде, а южнее расположены дивергенции. На участке Камчатского, Северо-Курильского течения и Ойясио расположены небольшие по площади области дивергенции потоков.

Статистические характеристики уровенных альтиметрических измерений и дивергенция полных потоков рассчитаны и картированы для трех масштабов осреднения: для доступного периода наблюдения (1992–2007), для каждого года отдельно (16 карт) и среднемесячные по всему периоду наблюдений (12 карт).

Для определения амплитуд годовой и полугодовой гармоник использовались значения морского уровня, измеренные на 130 береговых станциях северной части Тихого океана (архив JASL). На основе Фурье разложения среднемесячных значений были выделены амплитуды годовых и полугодовых колебаний. Рассчитывались и картировались также амплитуды и фазы годовых и полугодовых колебаний аномалий уровня моря по альтиметрическим данным. Для оценки пространственно-временной изменчивости амплитуд и фаз годовых и полугодовых колебаний уровня моря перейдем к анализу вейвлет-коэффициентов, рассчитанных для годового и полугодового периодов. Рассмотрим изоплеты вейвлет-коэффициентов годового и полугодового масштабов для двух пространственных разрезов северо-западной части Тихого океана: широтного – по 35° с.ш. и меридионального



Опыт картирования характеристик уровня северо-западной части Тихого океана на основе спутниковой информации

– по 150° в.д. В каждой узловой точке меридионального и широтного разрезов проведён вейвлет-анализ временных рядов и вычислены вейвлет-коэффициенты для годового и полугодового масштабов как функции времени. Вейвлет-коэффициенты картированы в виде изоплет, где по оси абсцисс отложено время (в годах), а по оси ординат – широта (в градусах) для меридионального разреза и долгота (в градусах) для широтного разреза. На рис. 4 цветом показаны значения вейвлет-коэффициентов для полугодовых составляющих колебаний уровня океана на широтном разрезе (35° с.ш.). Таким образом, можно проследить пространственно-временную изменчивость вклада полугодовых и годовых колебаний в изменчивость уровня моря. На примере изменчивости пространственного распределения годовых и полугодовых колебаний уровня в Атласе рассматривается кинематика низкочастотных градиентно-вихревых волн типа волн Россби.

Для указанных трех масштабов осреднения по уклонам уровня рассчитывались и картировались геострофические течения для абсолютной и относительной динамической топографии.

Среднемноголетняя геострофическая циркуляция, построенная по абсолютным значениям уровня (ADT), отражает общую циркуляцию вод северо-западной части Тихого океана (рис. 5). В районе $30-35^\circ$ с.ш. хорошо виден главный поток Куроисио, омывающий Японию с востока, другая его ветвь идет через Корейский пролив в Японское море, распространяясь вдоль западного побережья Японии в виде Цусимского течения. Часть вод Цусимского течения выходит в океан через Сангарский пролив, другая ветвь направляется к северу и через пролив Лаперуза попадает в Охотское море и вдоль северного побережья Хоккайдо в виде течения Соя выходит через пролив Екатерины в океан. Небольшая часть течения Соя продолжает движение на северо-восток вдоль западного побережья о. Итуруп и выливается в океан через пролив Фриза. В районе 37° с.ш. 144° в.д. происходит разветвление главного потока Куроисио. От него отделяется меандрирующая северо-восточная ветвь с направлением векторов течения на северо-восток, которая переходит в Северо-Тихоокеанское течение, распространяющееся через океан до берегов Аляски, где разворачивается к западу и распространяется вдоль побережья в виде Аляскинского течения, переходящее затем в Алеутское течение.

Северо-восточная ветвь Куроисио разветвляется: в районе 40° с.ш. 150° в.д. происходит разделение потока на две ветви, одна из которых уходит на восток, а другая продолжает движение на северо-восток, но потом, в районе северо-западного хребта (приблизительно 45° с.ш. 170° в.д.), обе эти ветви вновь соединяются в единый поток. На карте выделяется также Камчатское течение, переходящее в Северо-Курильское течение и затем от пролива Бусоль – в холодное течение Ойясио. Максимальные значения средних абсолютных геострофических скоростей около 100 см/с достигаются в основном потоке Куроисио, южнее Хонсю; в потоке, называемом Продолжение Куроисио и в Цусимском течении скорости составляют $30-50$ см/с; в Северо-



Тихоокеанском, северо-восточной ветви Куроисио, Камчатском течении 10–40 см/с, а в Ойяисио и Алеутском течениях они не превышают 10–15 см/с.

Для оценки изменчивости геострофических течений, рассчитанных по абсолютной динамической топографии поверхности моря, рассчитывались эллипсы среднеквадратических отклонений (величины полуосей), а также коэффициенты вариации, как отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению. Коэффициент вариации показывает, в частности, что у берегов Японии, где его значения невелики и не превышают 0,25, течение Куроисио практически струйное, в то время как после отклонения течения на восток вдоль 35-й широты коэффициент вариации равен 1, что означает, что изменчивость течения сопоставима с модулем среднего течения. Такие расчеты проведены для всех указанных масштабов осреднения.

Среднегодовое геострофическое течение, рассчитанное по относительной динамической топографии, преимущественно дает информацию о квазистационарных вихрях (рис. 6). На карте осредненных за промежуток 1992–2007 гг. значений аномалий геострофических скоростей выделяется множество циклонических и антициклонических круговоротов. Три крупнейших квазистационарных вихря расположены в зоне действия Куроисио: один циклонический с центром в районе 33° с.ш. 138° в.д. и два антициклонических с центрами на 35° с.ш. 145° в.д. и 36° с.ш. 151° в.д. Вихри выделяются на всем протяжении потока Продолжение Куроисио, но интенсивность их уменьшается к востоку.

Приливные карты составлены на основе численной реализации гидродинамической модели приливов для акватории дальневосточных морей и прилегающей части Тихого океана с использованием спутниковой альтиметрической информации в соответствии с данными модели TPXO7.1 (TPXO7.1: Global Inverse Tide Model)¹, которая разработана в Орегонском государственном университете в 2002 году [11]. В модели выполняется ассимиляция ординат уровня в точках пересечений Т/Р, а также оценок уровня, полученных на основе результатов гармонического анализа временных рядов наблюдений береговых мареографов. В Атласе представлены котидальные карты и карты амплитуд для основных волн прилива M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 и Q_1 , составленные для северо-западной части Тихого океана на основе численной реализации модели TPXO7.1 с усвоением альтиметрической информации и мареографных данных. На рис. 7 в качестве примера представлена котидальная карта и карты амплитуд для основных волн прилива M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 и Q_1 , составленные для северо-западной части Тихого океана на основе численной реализации модели TPXO7.1 с усвоением альтиметрической информации и мареографных данных. Дополнительно в Атлас помещены приливные карты для двух долгопериодных волн M_f и M_m . Эти приливные карты соответствуют сложившимся представлениям о том, что долгопериодные приливные явления в северо-западной части Тихого океана формируются в результате сложной суперпозиции стояче-поступательных приливных волн.

¹ http://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO71.html



Опыт картирования характеристик уровня северо-западной части Тихого океана на основе спутниковой информации

Результаты расчета приливов по модели ТРХО7.1, помимо гармонических постоянных основных составляющих прилива для колебания уровня моря, содержат и гармонические постоянные для компонент приливного течения на меридиан и параллель. В Атласе приводятся карты характеристик приливного течения для восьми основных волн, а в приложении на компакт-диске помещены карты изофаз максимального приливного течения и карты соотношений больших и малых осей приливных эллипсов. На рис. 8 приведена одна из таких карт в качестве примера.

Заключение

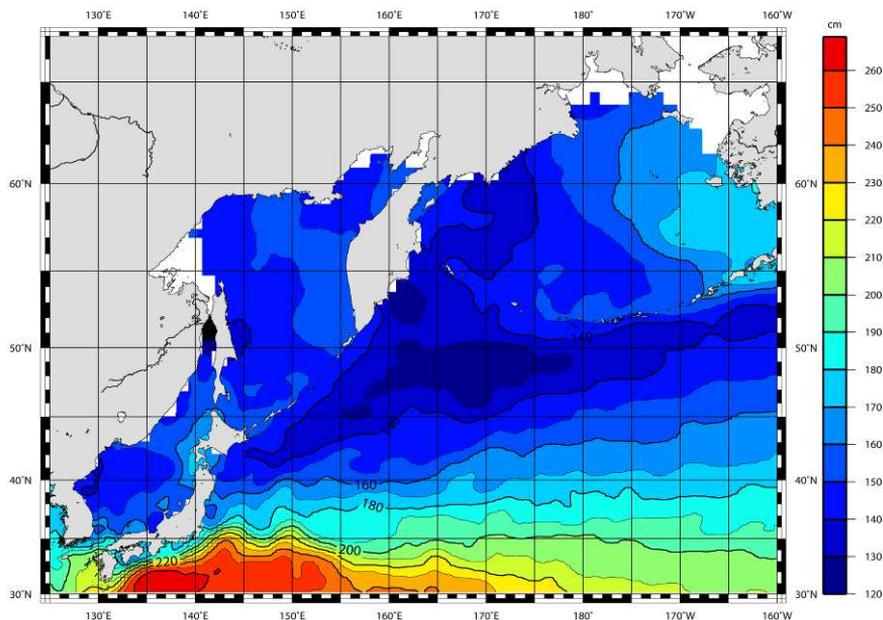
Мы надеемся, что представительное описание изменчивости уровня в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей, данное в Атласе, будет востребовано специалистами.

Литература

1. Белоненко Т. В., Колдунов В. В., Старицын Д. К., Фукс В.Р., Шилов И. О. «Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана». Монография. Издательство СММО-ПРЕСС, Санкт-Петербург. 2009. 309 с.
2. Белоненко Т. В., Фукс В. Р. и др. «Истоки Ойясио». Под ред. В.Р.Фукса, А. Н. Мичурина. СПб. 1997. 247 с.
3. *Oceanographic Atlas of the South Kurilean Region of the Pacific Ocean* / Intergovernmental Oceanographic Commission UNESCO. Editors: Prof.V.R.Foux, Prof. L.G.Karlin. SPb. St. Petersburg University publishing. 1998. 218 p.
4. *Океанографический атлас Южно-Курильского района Тихого океана* / Межправительственная океанографическая комиссия ЮНЕСКО. Под ред. В. Р. Фукса, Л. Н. Карлина. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета. 1998. 218 с.
5. Белоненко Т. В., Захарчук Е. А., Фукс В. Р. «Градиентно-вихревые волны в океане». СПб.: Издательство С.-Петербургского ун-та, 2004. 215 с.
6. Колдунов В. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р. «Изменчивость уровня Японского и Охотского морей по данным спутниковых альтиметрических измерений» / В кн.: «Дальневосточные моря России: в 4 кн. Кн.1: Океанологические исследования / отв. ред. В. Б. Лобанов, В. А. Лучин. Тихоокеанский океанологический ин-т им. В. И. Ильичева ДВО РАН. – М.: Наука, 2007. С.184-231.
7. Белоненко Т. В. Северо-западная часть Тихого океана. Исследование изменчивости уровня океана в системе вод Куроисио – Ойясио на основе спутниковой альтиметрической информации. Монография. 228 с. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2010.
8. Belonenko T. V., Foux V. R., Zakharchuk E. A. Gradient-vorticity waves in the World Ocean. Монография. 408 с. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2010.
9. Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. Москва. 2005. 367 с.
10. Wessel, P. and W. H. F. Smith. Free software helps map and display data. 1991. EOS Trans. AGU, 72, p.441.
11. Egbert, G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. 2002. J. Atm. Oceanic Technol., 19 (2), 183-204.



Атлас изменчивости уровня северо-западной части Тихого океана



2

Рис. 1. Математическое ожидание изменчивости абсолютной динамической топографии поверхности моря.

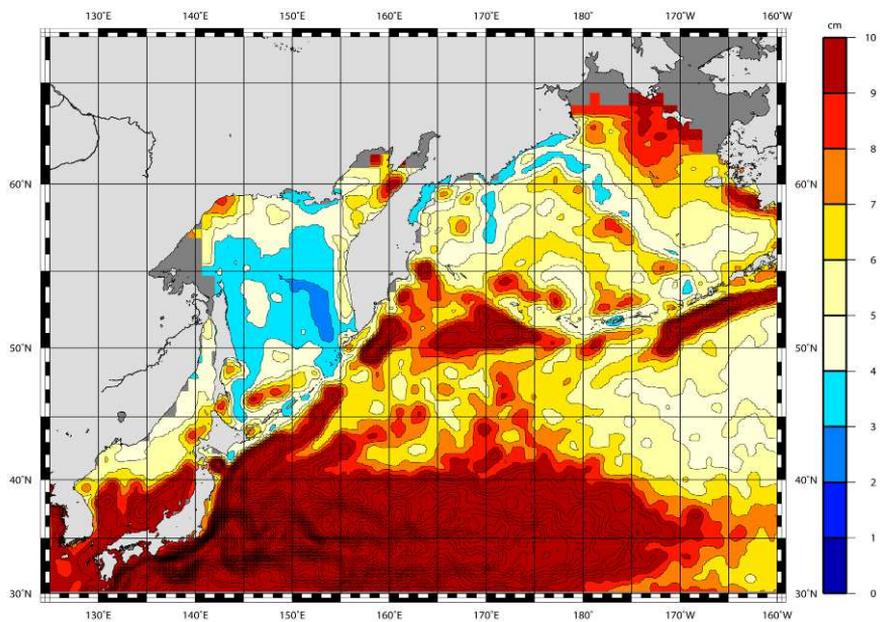


Рис. 2. Среднеквадратическое отклонение от среднемноголетних значений абсолютной динамической топографии поверхности моря.



Опыт картирования характеристик уровня
северо-западной части Тихого океана
на основе спутниковой информации

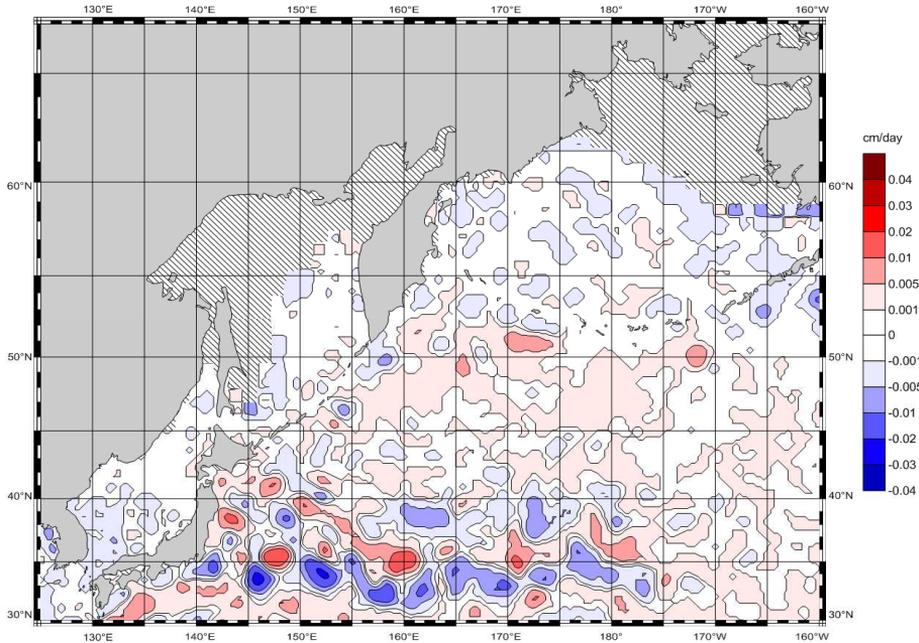


Рис. 3. Среднеголетняя дивергенция полных потоков.

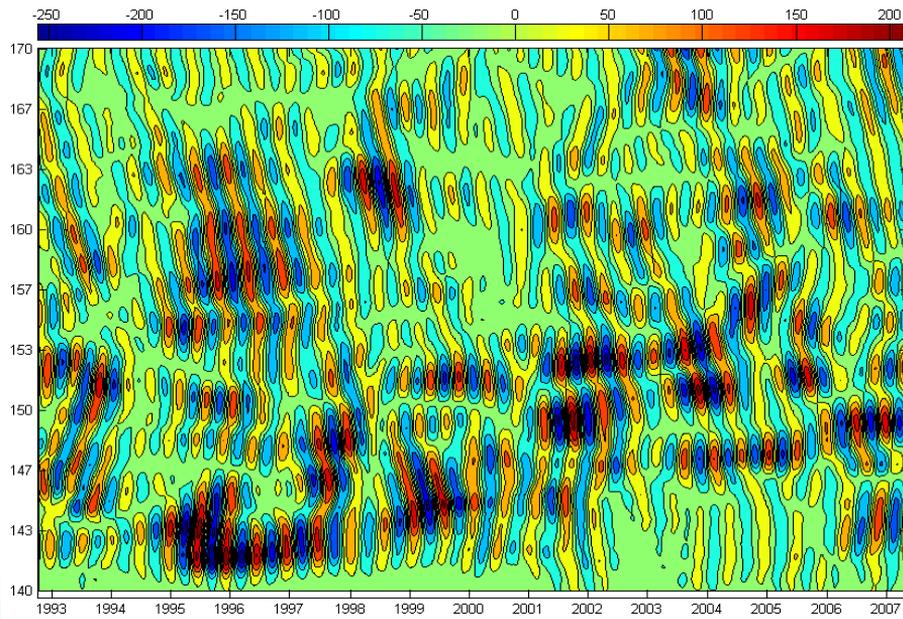
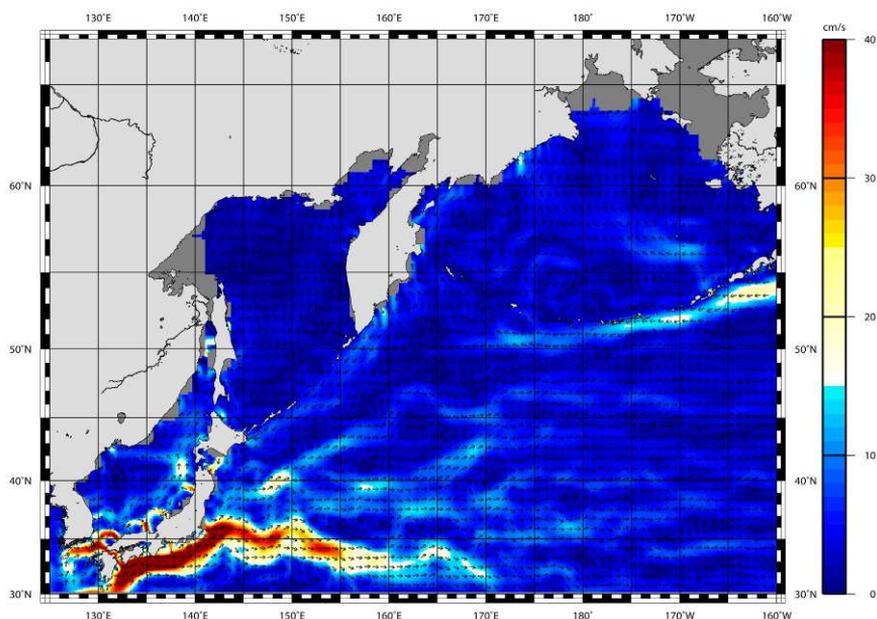


Рис. 4. Изоплеты вейвлет-коэффициентов (цветовая шкала) для полугодовых составляющих колебаний уровня океана на широтном разрезе (35° с.ш.). По оси абсцисс отложены годы, по оси ординат – градусы восточной долготы.



2

Рис. 5. Среднеголетняя геострофическая циркуляция, построенная по абсолютным значениям уровня (ADT).

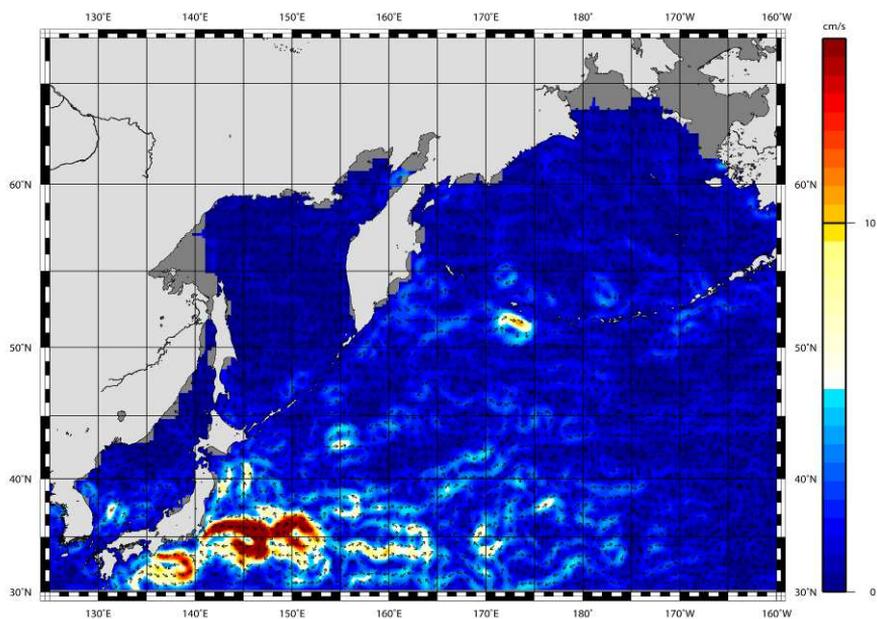


Рис. 6. Среднеголетняя геострофическая циркуляция, построенная по относительным значениям уровня (SLA).



Опыт картирования характеристик уровня
северо-западной части Тихого океана
на основе спутниковой информации

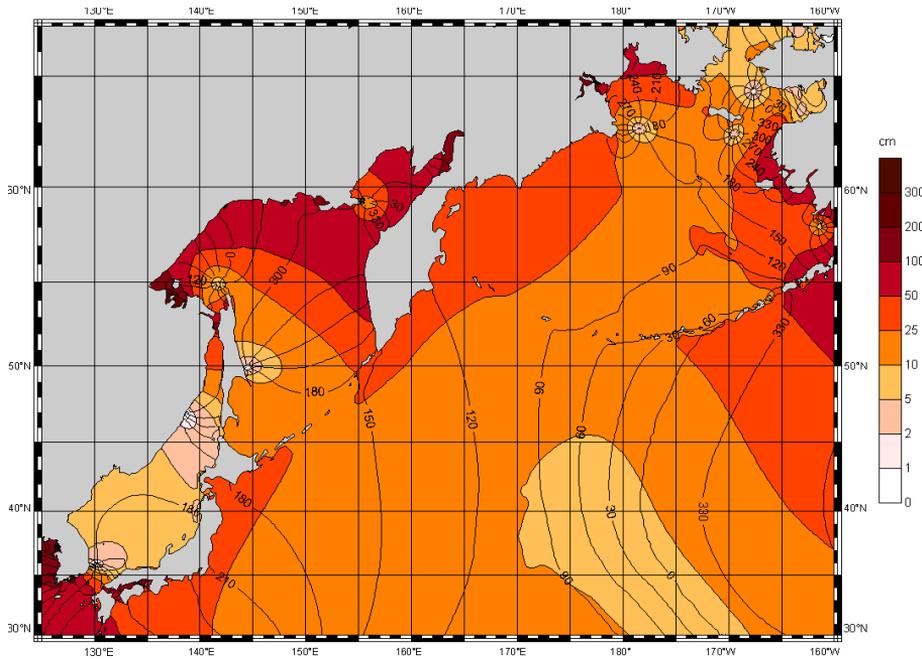


Рис. 7. Карта изоамплитуды (см) и изофазы ($^{\circ}$) лунной главной полусуточной волны M_2

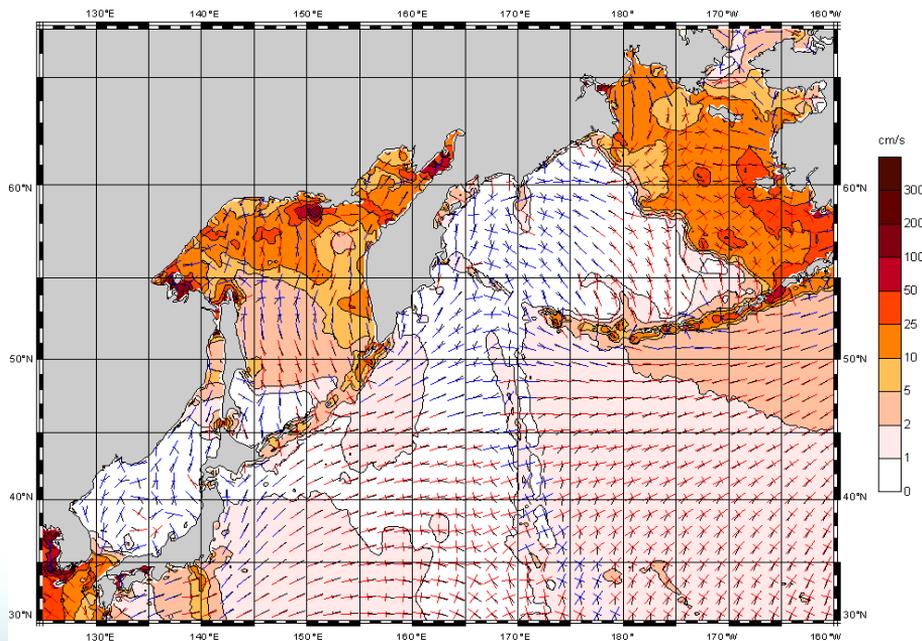


Рис. 8. Характеристики эллипсов приливных течений главной лунной полусуточной волны M_2 .