

О значении приливной коррекции для расчёта средних поверхностей уровня моря по данным спутниковой альтиметрии IMMOAD SSHA

Г. В. Шевченко^{1,2}, А. А. Романов³

¹ Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, 693023, Россия
E-mail: Shevchenko_zhora@mail.ru

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Южно-Сахалинск, 693023, Россия

³ АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»
Королёв, 141070, Московская обл., Россия

На основе массива аномалий уровня моря, сформированного по данным наблюдений с четырёх искусственных спутников Земли (*англ.* Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Datasets, Sea Surface Height Anomalies — IMMOAD SSHA) за 1992–2022 гг., рассчитаны средние многолетние распределения уровенной поверхности для различных сезонов и по полному году. Расчёты выполнены без учёта приливной коррекции и с её включением. Продемонстрировано, что расчёт по полному году в случае использования коррекции во всём изучаемом регионе даёт значения близкие к нулю, что подчёркивает её эффективность. Показано, что в зимний период значимые градиенты уровня наблюдаются вдоль побережья Охотского и Берингова морей, что указывает на интенсификацию циклонической циркуляции в этих бассейнах. Летом картина противоположная: у побережья этих морей низкие значения уровня, соответствующие формированию потоков противоположной направленности. Весной и осенью выраженных градиентов уровенной поверхности не наблюдается. Погрешности, вносимые остаточной приливной компонентой, имеют приблизительно одинаковое пространственное распределение во все сезоны (наибольшие значения — в зоне Куроиси и в заливах в северо-восточной и северо-западной частях Охотского моря). Очищенный от остаточного прилива массив аномалий уровенной поверхности не содержит составляющих, которые могут исказить среднюю уровенную поверхность при расчёте как за полный период времени, так и на отдельных интервалах, и его можно использовать для решения широкого круга задач океанологических исследований.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, уровень моря, аномалия, градиент, течение, прилив, северо-западная часть Тихого океана, дальневосточные моря

Одобрена к печати: 20.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-80-91

Введение

В работе (Шевченко и др., 2023) было выявлено, что в массиве аномалий уровня моря, сформированном на основе альтиметрических наблюдений с группы искусственных спутников Земли, с 1992 г. летавших по одним и тем же орбитам (*англ.* Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Datasets (IMMOAD), Sea Surface Height Anomalies (SSHA)), имеется остаточное влияние приливной компоненты. Из этих материалов уже был вычтен прилив согласно модели GlobalOceanTide (описание применявшихся на различных этапах формирования массива приливных поправок приведено в публикациях (Beckley et al., 2017, 2021), оно также доступно по ссылке https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MERGED_TP_J1_OSTM_OST_CYCLES_V51). Однако выяснилось, что качество фильтрации приливной компоненты при создании базы данных SSHA на ряде участков акватории дальневосточных морей (в особенности Охотского) и северо-западной части Тихого океана (СЗТО) было недостаточным, что выражалось в существенных значениях амплитуд главных приливных волн. Из-за специфической дискретности временных рядов (около 10 сут) в каждой точке подспутникового трека возникают искажения среднего значения ряда, чего обычно не происходит при стандартных ежечасных

наблюдениях за уровнем моря, когда на каждую фазу прилива (положительные или отрицательные отклонения от нулевого среднего) приходится одинаковое число отсчётов. Это важный момент для данной работы, поэтому проиллюстрируем его примером. На *рис. 1* представлен месячный ряд предвычисленного прилива. Расчёт выполнен по амплитудам и фазам восьми главных волн, определённым в точке 128 100 (остаточный прилив). Красными кружками отмечены точки через 10 сут, что соответствует дискретности данных альтиметрии. По этим четырём точкам, которые все пришлись на положительную фазу, среднее равно 6,7 см (среднее по месячному ряду равно нулю). Настоящая работа посвящена именно этому следствию выявленного остаточного прилива, точнее вкладу остаточного прилива в средние уровенные поверхности. Другим следствием является формирование ложных составляющих с периодами около двух и трёх месяцев, которые в данной работе не рассматриваются. Наличие приливного сигнала на этих периодах в ряде прибрежных районов Северной Пацифики выявили ранее авторы работы (Zaron, Ray, 2018).

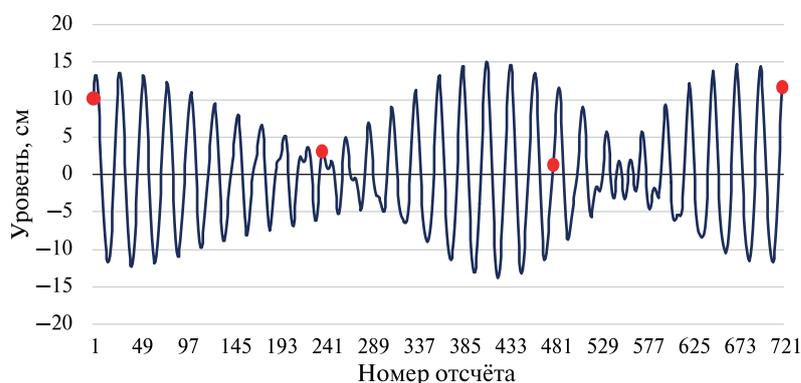


Рис. 1. Предвычисленный приливной месячный ряд в точке 128 100 (остаточный прилив). Красными точками отмечены значения через 10 сут

Также было отмечено влияние прилива на формирование ложных вариаций с периодами год и полгода, что может приводить к ошибкам при изучении сезонных вариаций уровня в изучаемом регионе. В то же время вариации уровня моря различных пространственных и временных масштабов по данным спутниковой альтиметрии широко используются для изучения динамических процессов в СЗТО (Белоненко, 2013; Белоненко и др., 2009), поэтому элиминация остаточной приливной компоненты из массива IMMOAD SSHA представляется важной задачей.

Необходимо отметить, что непосредственно к этому массиву редко прибегают при использовании данных спутниковой альтиметрии в океанологических исследованиях. Большинство исследователей обращается к массивам среднего уровня моря (*англ.* Mesoscale Sea Surface Height — MSSH), его аномалий (SSHA) или средней динамической топографии (*англ.* Mean Dynamic Topography — MDT), предоставляемых на портале системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS, <http://marine.copernicus.eu>). При подготовке этих продуктов используются материалы альтиметрических измерений и других спутников (ERA (*англ.* European Reanalysis), Envisat и т.д.), проводится их взаимная увязка, интерполяция на регулярную сетку и иная дополнительная обработка. Тем не менее массив IMMOAD SSHA — важная часть этих продуктов, и наличие в нём остаточной приливной составляющей может создавать существенные трудности при их формировании.

В связи с выявлением указанных выше аспектов, негативно влияющих на возможность использования массива данных альтиметрических наблюдений, цель настоящего исследования состояла в детальном изучении влияния введённой в работу (Шевченко и др., 2023) приливной поправки на средние многолетние распределения IMMOAD SSHA как в целом по году, так и для различных сезонов по отдельности.

Материалы и методы исследования

Исходными данными для настоящего исследования послужили материалы спутниковых альтиметрических наблюдений в виде значений аномалии уровенной поверхности (массив данных IMMOAD v5.1, SSNA). Эти данные рассматривались в двух вариантах: исходные значения, взятые с сайта https://podaac.jpl.nasa.gov/cloud-datasets?search=/MERGED_TP_J1_OSTM_OST_CYCLES_V51, а также полученные путём введения приливной коррекции (Шевченко и др., 2023). Область исследования охватывала северо-западную часть Тихого океана (СЗТО) и дальневосточных морей, она была ограничена координатами 35–66° с. ш. и 135–180° в. д. Всего в ней было 17 530 точек, лежащих на подспутниковых треках, по которым изначально был запущен искусственный спутник Земли (ИСЗ) TOPEX/Poseidon (англ. Topography Experiment/Poseidon) (подробное описание приведено в указанной работе). Период наблюдений составил 29,5 лет (с сентября 1992 г. по март 2022 г.).

Дополнительная приливная коррекция осуществлялась вычитанием из исходных значений прилива, предвычисленного на основе вычисленных в каждой точке амплитуд и фаз главных приливных волн (рассчитывались параметры восьми волн: четырёх — суточного диапазона (Q1, O1, K1, P1) и четырёх — полусуточного (N2, M2, S2 K2)). Ещё раз отметим, что, хотя при формировании массива SSNA из данных альтиметрии уже был вычтен прилив, однако на некоторых участках изучаемой акватории амплитуды главных приливных волн имели существенную величину.

Полученные после дополнительной коррекции остаточные ряды (в дальнейшем обозначаются как SSHAR (англ. Sea Surface Height Anomalies Residual)) усреднялись помесечно за весь имеющийся период наблюдений (1992–2022), а затем посезонно и по полному году (полные годовые ряды за 1993–2021 гг.). Аналогичная процедура применялась к исходному массиву без учёта приливной коррекции (англ. Sea Surface Height Anomalies Initial — SSHAI). Основным содержанием работы был сравнительный анализ пространственных распределений SSHAI и SSHAR по полному году и для различных сезонов. Разность этих распределений представляет среднюю уровенную поверхность, создаваемую остаточным приливом, определение которой является целью настоящей работы, так как именно она и вносит искажения при расчётах среднего поля за указанный интервал времени (аналогичные погрешности возникают и при расчётах за более короткие промежутки времени).

Результаты и обсуждение

Рассмотрим вначале пространственные распределения уровенных поверхностей SSHAI и SSHAR, приведённые на *рис. 2* (см. с. 83). Включение приливной коррекции привело к тому, что усреднённые значения SSHAR повсеместно близки к нулю, что и должно наблюдаться для аномалий. Их вариации незначительны, преимущественно в пределах 1–2 см, нет даже локальных участков, на которых значения параметра имеют существенную величину.

В то же время значения SSHAI практически на всей акватории положительные и на существенных по площади районах достигают значимой величины 10–15 см. Наиболее выделяется высокими значениями акватория к востоку от о. Хонсю, в особенности участок на меридиане 145° в. д., где часто наблюдается меандрирование Куроисио и образование тёплых антициклонических вихрей, движущихся в направлении о. Хоккайдо и южных Курильских о-вов. Аналогичные локальные области меньших размеров отмечены у южной оконечности Камчатки, на Северных Курилах, в Пенжинской и Гижигинской губах на северо-востоке Охотского моря. Отрицательные отклонения наблюдаются лишь на нескольких локальных участках: вблизи Алеутских, Командорских и Ямских островов, вдоль северо-западного берега Берингова моря, причём их величина не превышала 5 см по абсолютной величине.

Таким образом, сравнение пространственных распределений усреднённых по полному году уровенных поверхностей SSHAI и SSHAR показало, что использование дополнительной приливной коррекции (Шевченко и др., 2023) оказалось весьма эффективным, она практиче-

ски полностью исключает ложную среднюю поверхность и обусловленные её наличием несуществующие в действительности квазистационарные течения.

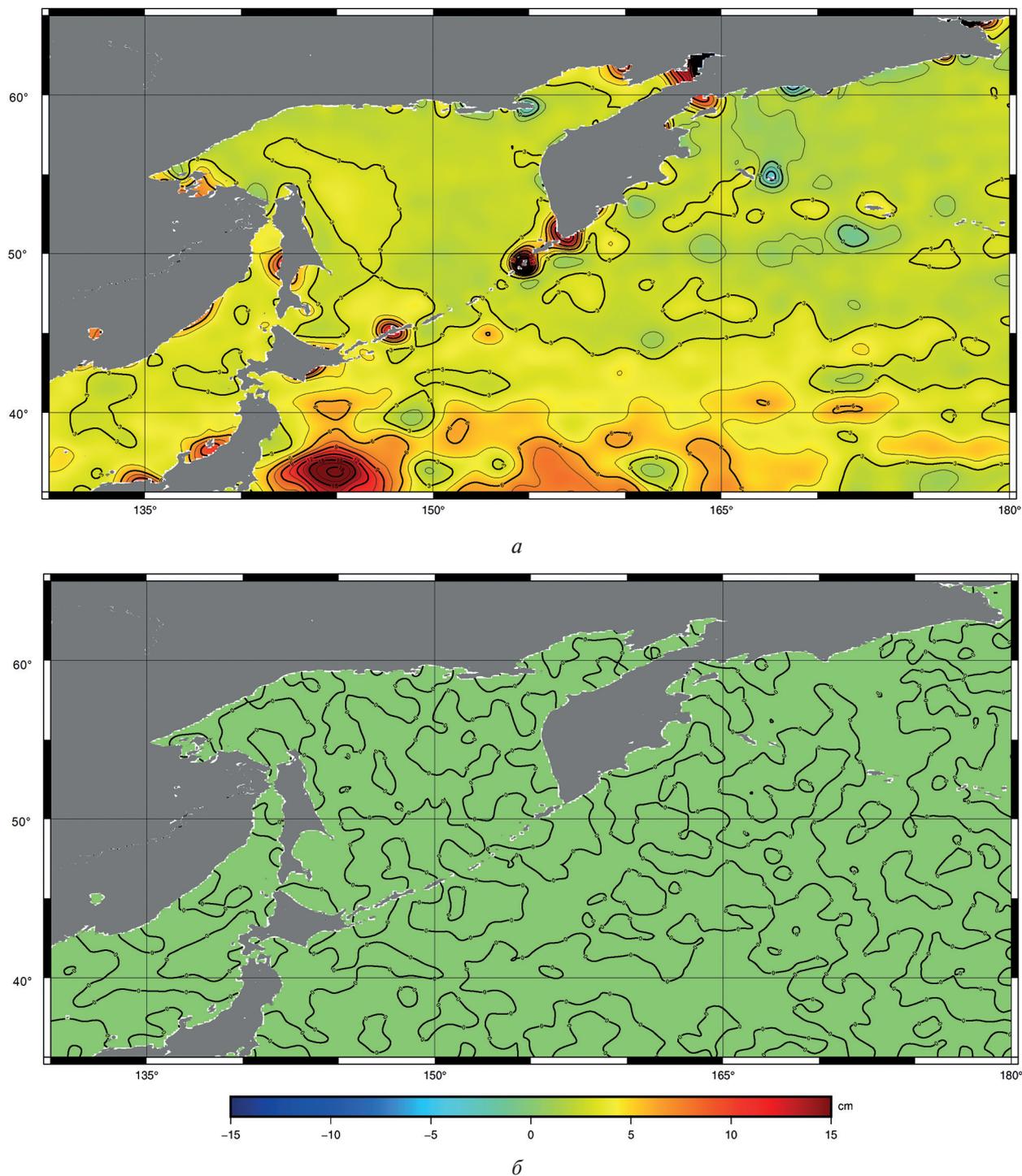


Рис. 2. Среднее многолетнее распределение аномалии уровенной поверхности (в см) в дальневосточных морях и СЗТО без учёта приливной коррекции (SSIAI) (а) и с её включением (SSHAR) (б)

Обратимся теперь к анализу усреднённых пространственных распределений SSHAR для различных сезонов года. В дальневосточных морях гидрологические сезоны смещены на месяц по сравнению с календарными, так как март более типичный месяц для зимы, чем декабрь, также как сентябрь более летний, чем июнь. Мы также следовали этой традиции.

В отличие от рассмотренной выше ситуации, даже с учётом введённой приливной коррекции эти распределения не обязательно должны быть близки к нулю и могут иметь реальный физический смысл. Он не только может быть связан с наличием некоторой поправки к усреднённой поверхности уровня, от которой, собственно, отсчитываются аномалии, но также может отражать сезонные вариации уровня моря, имеющие в дальневосточных морях существенную величину и носящие противоположный характер в тёплый и холодный периоды года, по крайней мере в Охотском море и прилегающих акваториях (Шевченко, Романов, 2006). По этой причине данные распределения заслуживают тщательного анализа, в особенности SSHAR, которые можно рассматривать как не искажённые остаточным влиянием прилива и которым уделено основное внимание (для разных сезонов эти распределения, а также разность между SSHAI и SSHAR представлены на *рис. 3–6* (см. с. 85–88)). Различия между этими поверхностями (из первого массива вычитался второй, и разница характеризует ошибку, вносимую остаточным приливом) в разные сезоны также могут быть существенными и проявляться в большей мере на отдельных участках изучаемой акватории; эти особенности также интересны и подробно рассматриваются ниже.

Зимой вдоль побережья Охотского и Берингова морей наблюдаются высокие значения уровня (см. *рис. 3а*), что указывает на формирование градиентных течений, ориентированных вдоль изолиний уровенной поверхности вправо, если смотреть в сторону более низких значений. Это соответствует усилению циклонической циркуляции в первом из указанных бассейнов и формированию потока юго-западного направления во втором бассейне, начиная от п-ова Чукотка. Поскольку мы рассматриваем аномалии уровня моря, то речь идёт не о собственно циркуляции, а о сезонной поправке к усреднённому полю течений. Это относится и к дальнейшим рассуждениям о градиентных течениях, обусловленных уклонами уровенной поверхности SSHAR. Близкое к нулю среднее значение уровня по полному году говорит о том, что в тёплый период года ситуация должна быть обратной, однако зимой прибрежные потоки весьма интенсивны.

В центре Охотского моря образуется область с низкими значениями уровня с минимумом над впадиной Дерюгина, все звенья циркуляционной цепи (Западно-Камчатское, Северо-Охотское и Восточно-Сахалинское течения) достигают своей максимальной интенсивности — этот вывод, сделанный для сезонной поправки, согласуется с результатами работы (Шевченко, Романов, 2006), полученными по уклонам усреднённой уровенной поверхности на основе альтиметрических данных со спутников TOPEX/Poseidon. В Японском море заметных градиентов уровня не наблюдается, существенной активизации циркуляции не отмечено. Это относится и к СЗТО, где область низких значений SSHAR между Курильскими о-вами и Куроисио разделяет зоны с более высокими уровнями. Однако интенсивность Курильского течения сравнительно невысокая по сравнению с Камчатским и Западно-Камчатским.

Различия между SSHAI и SSHAR, характеризующие вносимые остаточным приливом искажения среднего уровня, на большей части изучаемого района сравнительно невелики (см. *рис. 3б*), преобладают положительные отклонения (отрицательные наблюдаются на небольших по площади прибрежных участках). Наиболее существенны различия в акватории к востоку от о. Хонсю, в зоне влияния Куроисио, а также в заливах на северо-востоке (Пенжинская, Гижигинская губы) и на северо-западе Охотского моря (Удская губа, Тугурский зал.).

Весной градиенты уровенной поверхности в целом незначительные (см. *рис. 4а*). Обращает внимание её плавная крупномасштабная изменчивость, выраженная в низких значениях SSHAR в южной части изучаемой акватории: как в зоне тёплого Цусимского течения в Японском море, так и в СЗТО. Наиболее высокие уровни отмечены на северном шельфе Охотского моря, у западного берега Камчатки и у южного берега Чукотки, а также вдоль Курильской островной гряды. Формирование более высоких значений уровня моря в этих районах обусловлено действием характерных для тёплого сезона ветров южного румба (летний муссон). Слабо выраженные градиенты и плавные вариации параметра указывают на повсеместное ослабление циркуляции вод в пределах всего рассматриваемого региона по сравнению с зимним периодом.

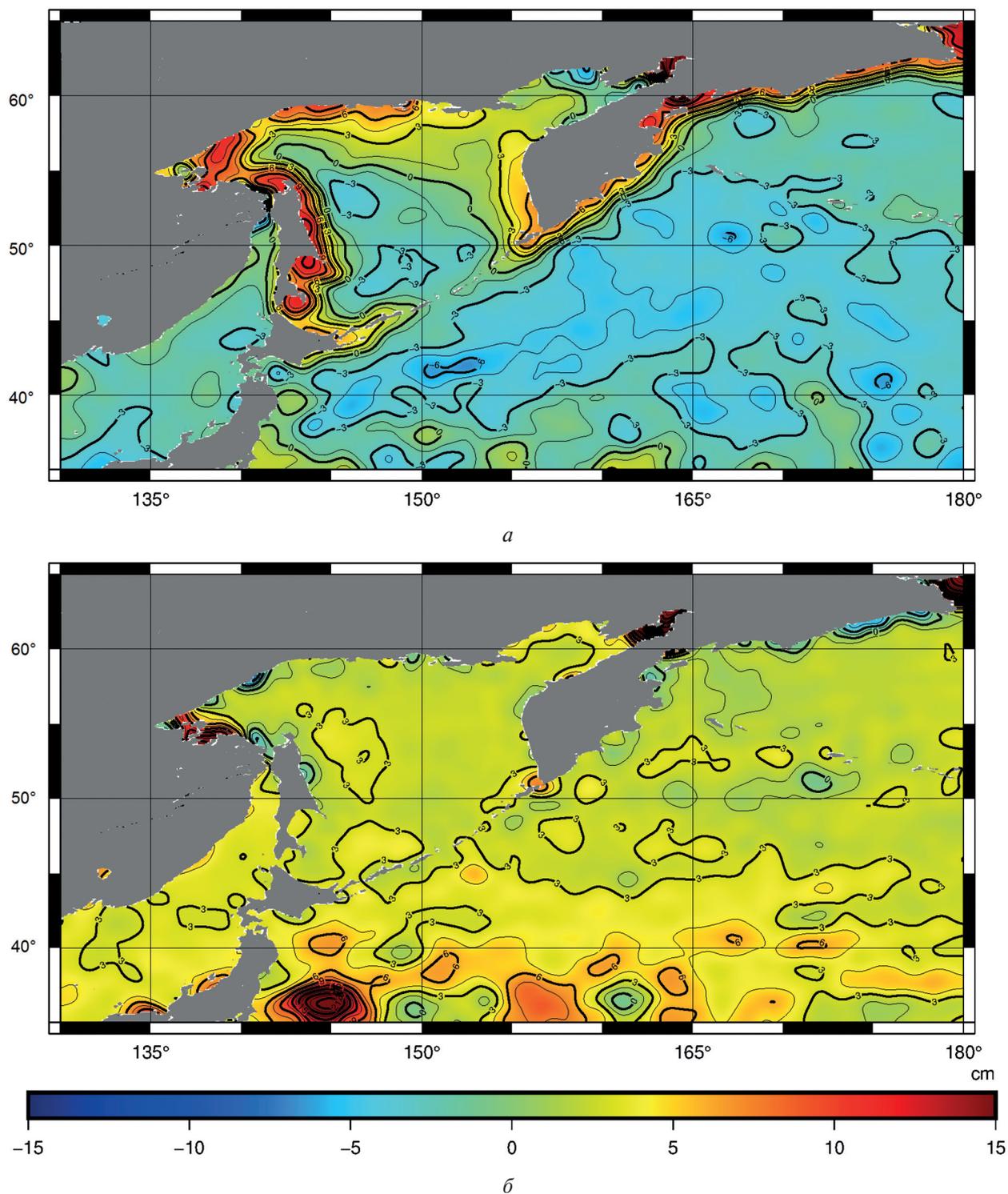


Рис. 3. Среднее многолетнее распределение аномалии уровневой поверхности (в см) в дальневосточных морях и СЗТО с учётом приливной коррекции (а) и разности между SSHAI и SSHAR (б) зимой (январь – март)

Пространственное распределение разницы поверхностей SSHAI и SSHAR в целом незначительно отличается от рассмотренного выше для зимы (см. рис. 4б). Наибольшие погрешности, вносимые остаточным приливом, отмечены у западного и восточного побережья о. Хонсю, вдоль сороковой параллели, в заливах на северо-востоке и северо-западе Охотского моря (в последнем случае они поменяли знак по сравнению с зимой).

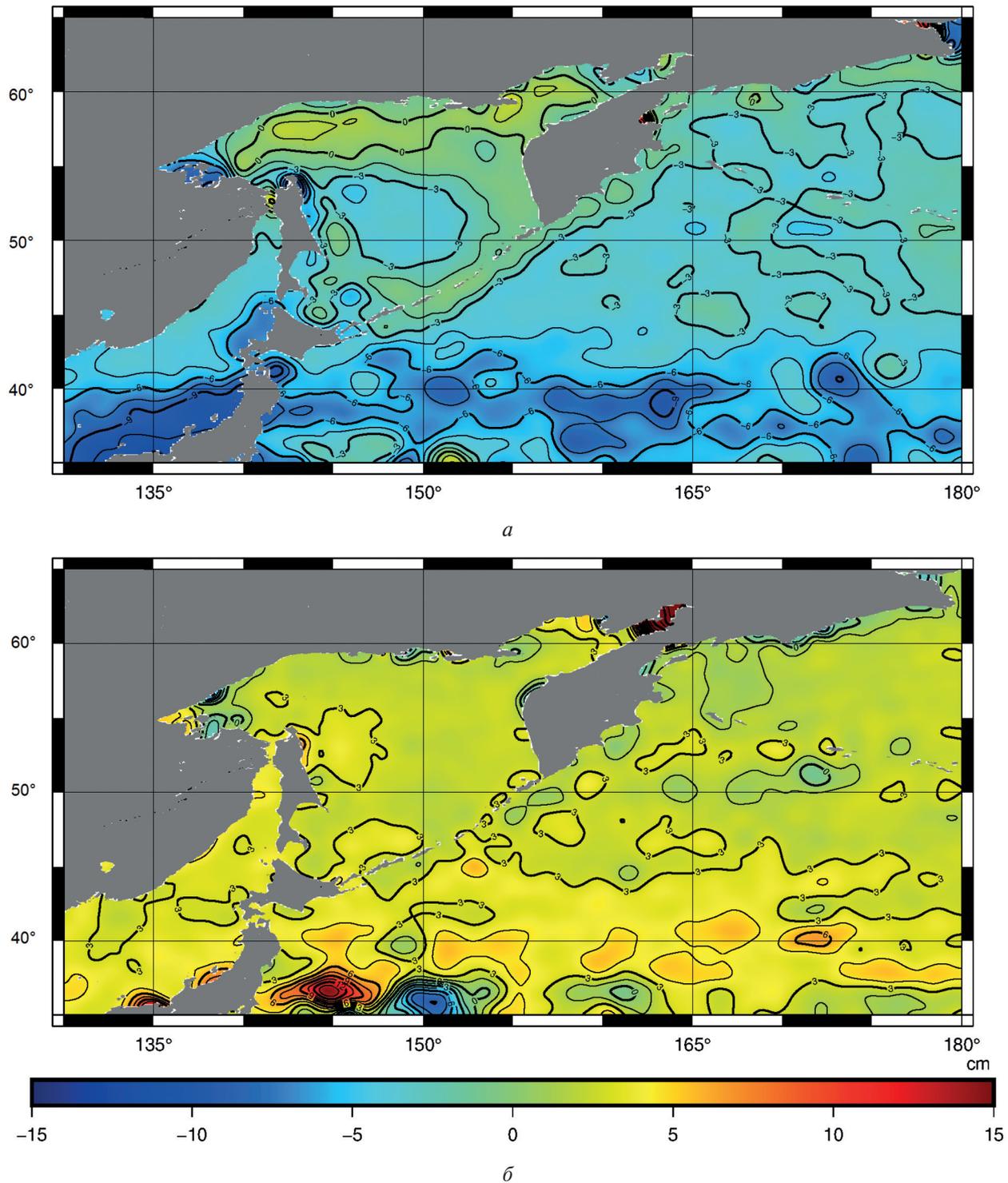


Рис. 4. Среднее многолетнее распределение аномалии уровенной поверхности (в см) в дальневосточных морях и СЗТО с учётом приливной коррекции (*a*) и разности между SSHAI и SSHAR (*b*) весной (апрель – июнь)

Летом, как и следовало ожидать, распределение усреднённой уровенной поверхности SSHAR противоположно зимнему: в центральной части Охотского моря — слабо выраженное поднятие, низкие значения — по его периферии, особенно вдоль восточного берега о. Сахалин, у юго-западного п-ова Камчатка, в районе Северных и Южных Курил (см. рис. 5а).

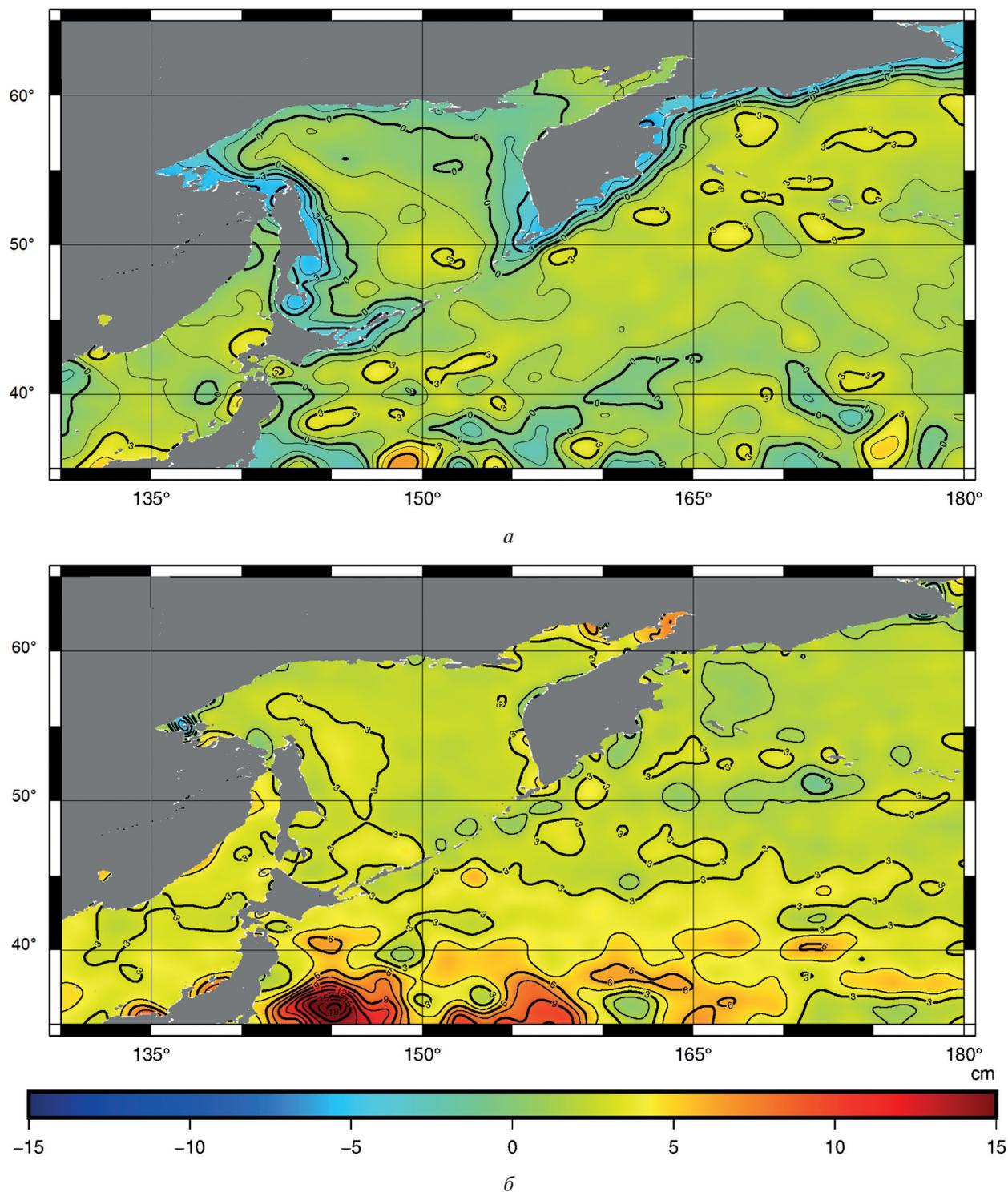


Рис. 5. Среднее многолетнее распределение аномалии уровневой поверхности (в см) в дальневосточных морях и СЗТО с учётом приливной коррекции (а) и разности между SSHAI и SSHAR (б) летом (июль – сентябрь)

В меньшей степени понижение уровня выражено на северном шельфе моря. Такой характер уклонов свидетельствует, в частности, о формировании противотечений Восточно-Сахалинскому и Западно-Камчатскому течениям в тёплый период года. У восточного берега Сахалина наиболее выраженные градиенты отмечены на некотором удалении от берега. Это означает, что поток северного румба формируется за свалом глубин, в открытом море.

Аналогичная картина отмечается и вдоль всего восточного побережья Берингова моря и океанского берега юго-восточной Камчатки, в том числе вдоль берега Чукотки через Берингов пролив наблюдается поток в Чукотское море. Здесь также наиболее выраженные уклоны уровенной поверхности выявлены на некотором удалении от линии берега.

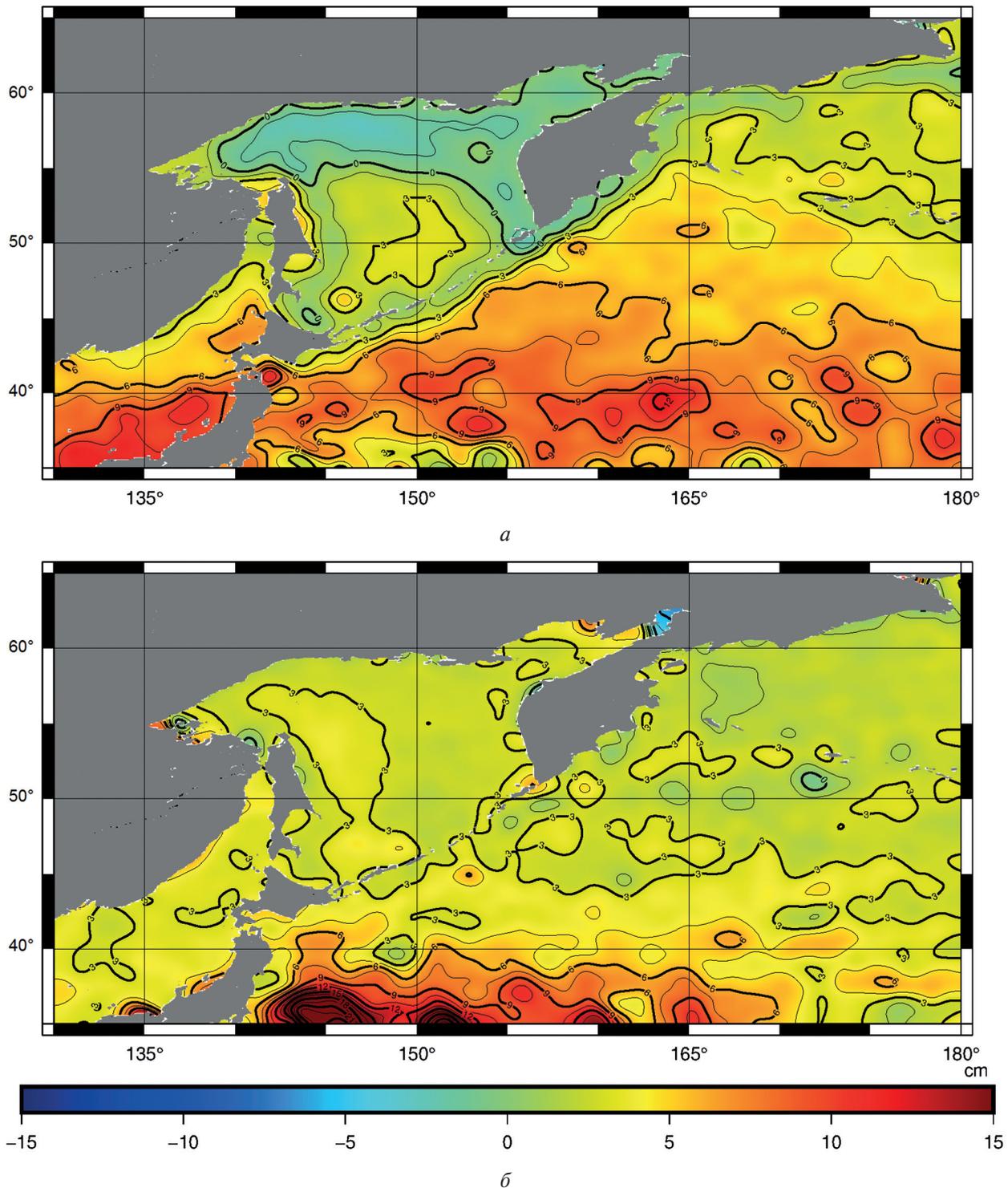


Рис. 6. Среднее многолетнее распределение аномалии уровенной поверхности (в см) в дальневосточных морях и СЗТО с учётом приливной коррекции (а) и разности между SSHAI и SSHAR (б) осенью (октябрь – декабрь)

На большей части акватории СЗТО и Японского моря аномалии положительные, но небольшие по величине, области с выраженными градиентами не выявлено. Исключение составляет зона влияния тёплого течения Куроисио, где отмечены участки с аномалиями разных знаков.

Пространственное распределение разности между SSHAI и SSHAR обнаруживает максимальные положительные значения в СЗТО вдоль южной границы изучаемой области и у западного побережья о. Хоккайдо (см. рис. 5б). В заливах Охотского моря, где вносимые приливом погрешности были наиболее существенны, её значения заметно снижаются.

Если весной в зоне влияния тёплых течений Цусимское и Куроисио наблюдались низкие значения уровня, то осенью (см. рис. 6а) здесь отмечены положительные аномалии. Отрицательные выявлены прежде всего на северном шельфе Охотского моря, где они являются следствием масштабного апвеллинга, развивающегося под действием устанавливающихся в октябре сильных и устойчивых отжимных ветров северо-западного румба (зимний муссон), что согласуется с результатами (Шевченко, Романов, 2006). Вдоль западного берега Берингова моря и у побережья Приморья наблюдаются более слабые отрицательные аномалии, хорошо выражены они только у юго-восточного берега Камчатки. Вдоль восточного побережья Сахалина выделяется узкая полоса с положительными аномалиями SSHAR, что соответствует начальной (прибрежной) фазе активизации Восточно-Сахалинского течения, наблюдающейся в октябре – ноябре (Шевченко, Романов, 2006).

Распределение разности уровенных поверхностей без учёта приливной коррекции и с её включением аналогично наблюдаемому летом, когда главным фактором становятся высокие значения вдоль южной границы изучаемого региона (см. рис. 5б). Наиболее значимые различия выявлены в Пенжинской губе, где существенные положительные аномалии сменились на отрицательные.

Заключение

Подводя итоги проведённого исследования, можно сделать следующие выводы. Во-первых, усреднённое по полному году распределение уровенной поверхности с учётом дополнительной приливной коррекции (Шевченко и др., 2023) во всём изучаемом регионе близко к нулю. Это означает, что введение этой коррекции, направленной на устранение остаточного влияния прилива в массиве IMMOAD SSNA, оказалось весьма эффективным и позволило исключить ложные составляющие, которые могут исказить расчёты квазистационарных течений в СЗТО и дальневосточных морях.

Пространственные распределения аномалий уровенной поверхности с учётом приливной коррекции для различных сезонов на ряде участков изучаемого региона отличны от нуля и отражают изменчивость сезонных поправок к общей картине циркуляции вод. Наиболее велики её градиенты зимой и летом вдоль побережья Охотского моря и западного берега Берингова моря, а также на юго-восточном шельфе Камчатки. Зимой уровень убывает в направлении открытого моря, что означает активизацию всех звеньев циклонической циркуляционной системы в первом из указанных бассейнов (Западно-Камчатского, Северо-Охотского и Восточно-Сахалинского) и прибрежного потока юго-западного направления вдоль северо-восточного берега Азии от Берингова пролива до северных Курильских о-вов.

Летом на этих же прибрежных участках уровень возрастает по мере удаления от берега, что указывает на формирование прибрежной циркуляции в обратном направлении.

Весной и осенью градиенты уровня существенно меньше, течения выражены слабее. Следует подчеркнуть, что в данном случае мы рассматриваем аномалии уровня моря, т. е. автоматически исключены стационарные течения, действующие в течение всего года (в частности, Куроисио (Белоненко и др., 2009)). В первом случае отрицательные аномалии отмечены вблизи западного побережья островов Хонсю и Хоккайдо, а также к востоку от Японии, в южной части СЗТО. Осенью в этих районах отмечены существенные положительные аномалии. Выделяется также северный шельф Охотского моря, в котором положительные аномалии

весной сменяются отрицательными осенью. Здесь наиболее вероятной причиной таких изменений представляется действие муссона: в тёплый период преобладают нагонные ветры южного румба, в холодный устанавливается сгонный северо-западный ветер.

Погрешности, вносимые остаточной приливной компонентой, в различные сезоны имеют сходное распределение (только в некоторых случаях они принимают разные знаки при существенных значениях по абсолютной величине). Наибольшей величины они достигают вблизи южной границы изучаемого региона, в части СЗТО южнее сороковой параллели, а также в заливах в северо-восточной и северо-западной частях Охотского моря.

Очищенный от остаточного прилива массив аномалий уровенной поверхности не содержит ложных составляющих в средних полях, и его можно использовать для решения широкого круга задач океанологических исследований. Об этом свидетельствует и чёткая, имеющая ясное физическое объяснение картина сезонных вариаций уровня моря в СЗТО и дальневосточных морях. Поэтому выявленное нами недостаточное устранение прилива из этого массива представляется нам весьма важным, и, мы надеемся, будет полезным в дальнейшем при подготовке данных CMEMS.

Литература

1. Белоненко Т. В. Спутниковая альтиметрия северо-западной части Тихого океана // Изв. Российского гос. педагог. ун-та им. А. И. Герцена. 2013. Т. 163. С. 120–128.
2. Белоненко Т. В., Колдунов В. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р., Шилов И. О. Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана. СПб.: Изд-во СММО-ПРЕСС, 2009. 309 с.
3. Шевченко Г. В., Романов А. А. Сезонная изменчивость циркуляции в верхнем слое Охотского моря по данным спутниковой альтиметрии // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 59–71.
4. Шевченко Г. В., Романов А. А., Цой А. Т. О точности устранения приливной компоненты из данных спутниковой альтиметрии IMMOAD SSHA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. № 4. С. 20–29. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-20-29.
5. Beckley B. D., Callahan P. S., Hancock D. W. et al. On the “cal-mode” correction to TOPEX satellite altimetry and its effect on the global mean sea level time series // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. P. 8371–8384. <https://doi.org/10.1002/2017JC013090>.
6. Beckley B., Zelensky N. P., Holmes S. A. et al. MERGED_TP_J1_OSTM_OST_ALL_V50. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA, USA, 2021. <https://doi.org/10.5067/ALTTS-TJA50>.
7. Zaron E. D., Ray R. D. Aliased tidal variability in mesoscale sea level anomaly maps // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2018. V. 35. Iss. 12. P. 2421–2435. DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0089.1.

On the importance of tidal correction for calculation of mean sea level surfaces from IMMOAD SSHA satellite altimetry data

G. V. Shevchenko^{1,2}, A. A. Romanov³

¹ *Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Sakhalin Branch
Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia
E-mail: Shevchenko_zhora@mail.ru*

² *Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS
Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia*

³ *AO Central Research Institute for Machine Building
Korolev 141070, Moscow Region, Russia*

Utilizing observation data from four artificial Earth satellites (Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Datasets, Sea Surface Height Anomalies — IMMOAD SSHA) spanning from 1992 to 2022, average long-term variations in sea level anomalies were computed for different seasons and the entire period. These computations were conducted both with and without accounting for tidal corrections.

Notably, employing tidal correction yielded values close to zero for the entire period within the study area, highlighting the effectiveness of the correction process. During winter, noticeable gradients in sea level anomalies were observed along the coasts of the Sea of Okhotsk and the Bering Sea, indicating intensified cyclonic circulation in these regions. Conversely, during summer, there were low sea level anomalies near these coasts, signifying the formation of opposing currents. Spring and autumn, on the other hand, did not exhibit pronounced gradients in sea level anomalies. Errors introduced by the residual tidal component exhibited similar spatial distributions across all seasons, with the highest values occurring in the Kuroshio zone and the bays in the northeastern and northwestern parts of the Sea of Okhotsk. The sea level anomalies, purged of residual tide effects, lack components that could distort the average sea level, both over the entire period and at specific intervals. This cleaned dataset can be employed in a wide array of oceanological studies.

Keywords: satellite altimetry, sea level anomalies, gradient, current, tide, Northwestern Pacific Ocean, Far Eastern seas

Accepted: 20.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-80-91

References

1. Belonenko T. V., Satellite altimetry of the North-Western Pacific, *Izvestia: Herzen University J. Humanities and Sciences*, 2013, Vol. 163, pp. 120–128 (in Russian).
2. Belonenko T. V., Koldunov V. V., Staritzin D. K., Foux V. R., Shilov I. O., *Sea-surface level variability in the North-Western Pacific*, Saint Petersburg: SMIO-Press, 2009, 309 p. (in Russian).
3. Shevchenko G. V., Romanov A. A., Seasonal variability of circulation in the upper layer of the Sea of Okhotsk according to satellite altimetry data, *Meteorology and Hydrology*, 2006, Issue 8, pp. 59–71 (in Russian).
4. Shevchenko G. V., Romanov A. A., Tsoy A. T., On the accuracy of removing the tidal component from IMMOAD SSHA satellite altimetry data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Issue 4, pp. 20–29 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-20-29.
5. Beckley B. D., Callahan P. S., Hancock D. W. et al., On the “cal-mode” correction to TOPEX satellite altimetry and its effect on the global mean sea level time series, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, pp. 8371–8384, <https://doi.org/10.1002/2017JC013090>.
6. Beckley B., Zelensky N. P., Holmes S. A., *MERGED_TP_J1_OSTM_OST_ALL_V50, Ver. 5.0*, PO.DAAC, CA, USA, 2021, <https://doi.org/10.5067/ALTTS-TJA50>.
7. Zaron E. D., Ray R. D., Aliased tidal variability in mesoscale sea level anomaly maps, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, Vol. 35, Issue 12, pp. 2421–2435, DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0089.1.