Методика расчёта межмиссионного смещения SWOT относительно Jason-CS для акватории Охотского моря

А. А. Романов, А. А. Романов[1]

[1] *Московский физико-технический институт* (*НИУ*)
Долгопрудный, *Московская обл.*, *141700*, *Россия*
E-mails: romulas@mail.ru, *aaromanov@tsniimash.ru*

Альтиметрические миссии TOPEX/Poseidon (*англ.* Topographic Experiment/Poseidon) и последующие Jason-1/2/3/CS за время своего непрерывного функционирования накопили существенный объём альтиметрической информации для акватории Мирового океана. Недавний запуск нового космического аппарата SWOT (*англ.* Surface Water and Ocean Topography) расширил возможности по изучению мезомасштабной изменчивости, однако практическое использование данных надирного альтиметра SWOT совместно с данными Jason-CS для региональных бассейнов, таких как Охотское море, затруднительно без проведения процедуры устранения локального межмиссионного смещения. В рамках выполненной работы проведён анализ на основе массива информации традиционного альтиметра SWOT и соответствующей ему выборки Jason-CS за период 2023–2026 гг. Предложена методика устранения локального межмиссионного смещения на основе эталонных данных спутника Jason-CS. Адаптивный алгоритм на основе регуляризации Тихонова реализует расчёт смещения, устойчивый к дефициту информации. В результате применения предложенной методики систематическое смещение между выборками данных уменьшилось с +2,26 до +0,71 см, а среднеквадратическая ошибка RMSE (*англ.* Root Mean Square Error) в точках кроссоверов сократилась на 43,9 %.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, Охотское море, методика устранения регионального межмиссионного смещения, SWOT, Jason-CS

Одобрена к печати: 24.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-9-21

Введение

Наиболее длительным рядом альтиметрических наблюдений обладают миссии альтиметрических космических аппаратов TOPEX/Poseidon (*англ.* Topographic Experiment/Poseidon) и Jason-1/2/3/CS, которые последовательно работают с 1992 г. по настоящее время, обладают идентичным временем изомаршрутного цикла — фактически летают по одним и тем же орбитам на протяжении всего этого времени. Поэтому информация указанных миссий выступает одновременно и стандартом, и эталоном альтиметрических измерений.

Запуск в конце 2022 г. инновационного франко-американского спутника SWOT (*англ.* Surface Water and Ocean Topography), оснащённого как классическим надирным альтиметром Poseidon-3C, так и широкополосным интерферометром KaRIn, открыл беспрецедентные возможности для изучения субмезомасштабных процессов (Fu et al., 2024). Однако практическое использование первичных данных надирного альтиметра SWOT для региональных бассейнов, таких как Охотское море, невозможно без проведения дополнительной межмиссионной калибровки.

Данные всех информационных продуктов традиционного альтиметра космического аппарата SWOT (мы здесь и далее будем говорить о продуктах с уровнем обработки 2) уже содержат учёт так называемой межмиссионной поправки (*англ.* intermission bias) с массивом информации космического аппарата Jason-CS (она уже автоматически учтена в переменной, соответствующей аномалии высоты морской поверхности SSH (*англ.* sea surface height), $SSH_{bias}(x)$) (https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT_L2_HR_PIXC_2.0). Сделано это для того, чтобы при совместном использовании данных миссий Jason-CS и SWOT не возникало дополнительных артефактов обработки при восстановлении пространственно-временного распределения аномалий высоты уровня моря. При этом в публикации (Le Traon, Ogor, 1998a) было

показано, что статистически некоторое смещение массивов информации (как минимум на ограниченных выборках, соответствующих отдельным циклам космических аппаратов) всё же присутствует и, следовательно, для дальнейшей обработки указанное смещение необходимо исключить.

Согласно руководству (https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT_L2_HR_PIXC_2.0), устранение межмиссионного смещения между надирными альтиметрами SWOT и Jason-CS не ограничивается глобальной константой, составляющей +1,015 см SWOT относительно Jason-CS: алгоритмы также корректируют пространственно-переменные погрешности состояния моря (*англ*. sea state bias) и остаточные орбитальные ошибки. Однако при работе в локальных регионах Мирового океана пользователям альтиметрической информации настоятельно рекомендуется проводить самостоятельную локальную фильтрацию остаточных длинноволновых ошибок, так как на региональном уровне (особенно в прибрежных и высокоширотных зонах) сохраняются пространственно-коррелированные погрешности, требующие дополнительного сглаживания и уточнения по точкам пересечения траекторий (так называемых точках кроссоверов (*англ*. crossovers)).

В рамках выполненной работы был проведён расчёт локального межмиссионного смещения текущего массива информации надирного альтиметра космического аппарата SWOT относительно соответствующей ему по времени измерений выборке из массива данных космического аппарата Jason-CS. Использовались массивы JASON_CS_S6A_L2_ALT_LR_RED_OST_NTC_G01 (https://user.eumetsat.int/data/satellites/sentinel-6) и SWOT_L2_NALT_GDR_SSHA_2.0 (https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT_L2_HR_PIXC_2.0), покрывающие временной период с 21.07.2023 по 23.01.2026, т. е. практически длительность анализируемых измерений составила порядка 2,5 лет. Предложена методика устранения остаточных орбитальных погрешностей и калибровочных смещений космического интерферометра SWOT на основе верифицированных данных спутника-ориентира Jason-CS, а также проведён анализ полученных результатов.

Описание предлагаемой методики

Орбитальная погрешность спутников SWOT и Jason-CS (Sentinel-6) на относительно коротких сегментах траектории ($\Delta t \approx 600$ с) носит низкочастотный характер и может быть аппроксимирована полиномом $P_d(x)$ степени $d \in \{1, 2, 3\}$. При работе в локальных акваториях (особенно в прибрежных и высокоширотных зонах) пользователям настоятельно рекомендуется проводить самостоятельную локальную фильтрацию остаточных длинноволновых ошибок, так как на региональном уровне сохраняются пространственно-коррелированные погрешности, требующие дополнительного сглаживания по точкам пересечения траекторий космических аппаратов (Chelton et al., 2001; Le Traon et al., 1998b; https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT_L2_HR_PIXC_2.0).

Для каждого независимого трека по набору уникальных точек кроссоверов N_x формируется переопределённая система уравнений. Истинный орбитальный тренд поправки $\Delta\mathrm{SSH}_{bias}(x)$ извлекается посредством минимизации функционала квадратичной ошибки с регуляризацией Тихонова (Tikhonov, 1963; Tikhonov, Arsenin, 1977). Важно отметить, что сам функционал $E(w)$ является скалярным критерием качества (метрикой потерь) оптимизации, в то время как искомый непрерывный профиль поправки выражается через полученный полином:

$$\Delta\mathrm{SSH}_{bias}(x) = P_d(x) = w_0 + w_1 x + w_2 x^2 + \cdots + w_d x^d.$$

Целевая функция минимизации имеет вид:

$$E(w) = \sum_{i=1}^{N_x} \left(\frac{y_i - P_d(x_i)}{\sigma} \right)^2 + \alpha \sum_{j=1}^{d} w_j^2,$$

где i — точки кроссоверов, соответствующие определённому треку SWOT, $i = 1, ..., N_x$; x_i — центрированное значение широты в точке кроссовера; y_i — вычисленная межинструментальная невязка уровней моря $\mathrm{dSSH}a_i = \mathrm{SSH}_{\mathrm{SWOT}} - \mathrm{SSH}_{\mathrm{Jason}}$; σ — среднеквадратичное отклонение аномалий уровня в регионе Охотского моря, σ = 2,5 см; w_j — искомые коэффициенты полинома (вектор w); α — параметр регуляризации Тихонова, ограничивающий дисперсию высших степеней полинома на краях интервала (эффект Ругге), α = 0,1; свободный член w_0 (константный сдвиг) регуляризации не подвергается.

Отдельно следует обратить внимание, что величина среднеквадратичного отклонения аномалий уровня бассейна Охотского моря (σ = 2,5 см) не является абстрактным заимствованным параметром. Данный инвариант статистически доказан и обоснован в исследовании (Романов, Романов, 2025), где представлена модель мезомасштабной изменчивости аномалий высоты поверхности Охотского моря.

Вектор оптимальных коэффициентов $w = [w_0, w_1, ..., w_d]^T$ находится в явном векторизованном виде из нормального уравнения метода наименьших квадратов:

$$w = (X^T W X + \alpha I')^{-1} X^T W y,$$

где X — матрица плана Вандермонда размерности $N_x \times (d+1)$, составленная из степеней центрированной широты; W — диагональная матрица весов размерности $N_x \times N_x$, $W_{ij} = 1/\sigma_i^2$; I' — модифицированная единичная матрица размерности $(d+1)\times(d+1)$, у которой первый диагональный элемент равен нулю $(I'_{1,1} = 0)$, что исключает «штрафование» свободного члена w_0 (константного смещения).

Финальный профиль поправки $\Delta\mathrm{SSH}_{bias}(x)$ экстраполируется на всю координатную сетку трека надирного альтиметра SWOT, после чего выполняется калибровка:

$$\mathrm{SSH}_{calibrated}(x) = \mathrm{SSH}_{original}(x) - \Delta\mathrm{SSH}_{bias}(x).$$

В зависимости от количества кроссоверов, которые были определены для каждого конкретного трека космического аппарата SWOT при расчёте коэффициентов полинома $P_d(x)$, динамически меняется показатель степени.

В случае $N_x \geqslant 10$, $d = 3$ — применяется полином третьей степени; если выполняется условие $6 \geqslant N_x < 10$, то используется полином второй степени; при $N_x < 6$ — полином первой степени. В среднем для акватории Охотского моря для каждого трека SWOT получается порядка восьми пересечений с треками опорного Jason-CS.

Проиллюстрируем работу предлагаемой методики и рассмотрим аппроксимацию поправок межмиссионного смещения для нескольких треков цикла № 1 космического аппарата SWOT с учётом изменения порядка полинома (*рис. 1*).

Адаптивный алгоритм на основе регуляризации Тихонова устойчив при любой плотности данных. При количестве кроссоверов $N_x = 19$ (см. *рис. 1а*) кубический полином ($d = 3$) описывает нелинейный тренд поправки примерно от −5 до +15 см. При $N_x = 8$ (см. *рис. 1б*) квадратичная модель формирует тренд поправки (в ориентировочном диапазоне от 2,5 до 15 см) с учётом пространственного разрыва данных между 54 и 58° с. ш. При дефиците измерений $N_x = 1$ (см. *рис. 1в*) рассчитывается фиксированный плоскопараллельный сдвиг −5,6 см. Использование предварительно вычисленного среднеквадратичного отклонения аномалий высоты уровня Охотского моря σ = 2,5 см (Романов, Романов, 2025) в качестве весового параметра для всех порядков полиномов предотвращает чрезмерное притягивание поправки к полученной разности аномалий высот в точках пересечения треков, обеспечивая необходимую гладкость калибровочного тренда.

В сущности, предлагаемый подход крайне близок к классическому методу (Jacobs et al., 2001) в частном случае, когда матрица ковариации ошибок аппроксимируется диагональной структурой (Tikhonov, 1963; Wunsch, 2009). Но в отличие от классического метода (Jacobs et al., 2001) и традиционных подходов к расчёту межмиссионного смещения на основе мультимиссионного кроссоверного распределения аномалий высоты поверхности моря (Le Traon, Ogor, 1998a), требующих пространственной непрерывности полей и инверсии полных кова-

риационных матриц, предложенный подход реализует потрековую калибровку, устойчивую к вырождению матриц на сегментах, «разорванных» сушей или прочими измерительными эффектами в Охотском море.

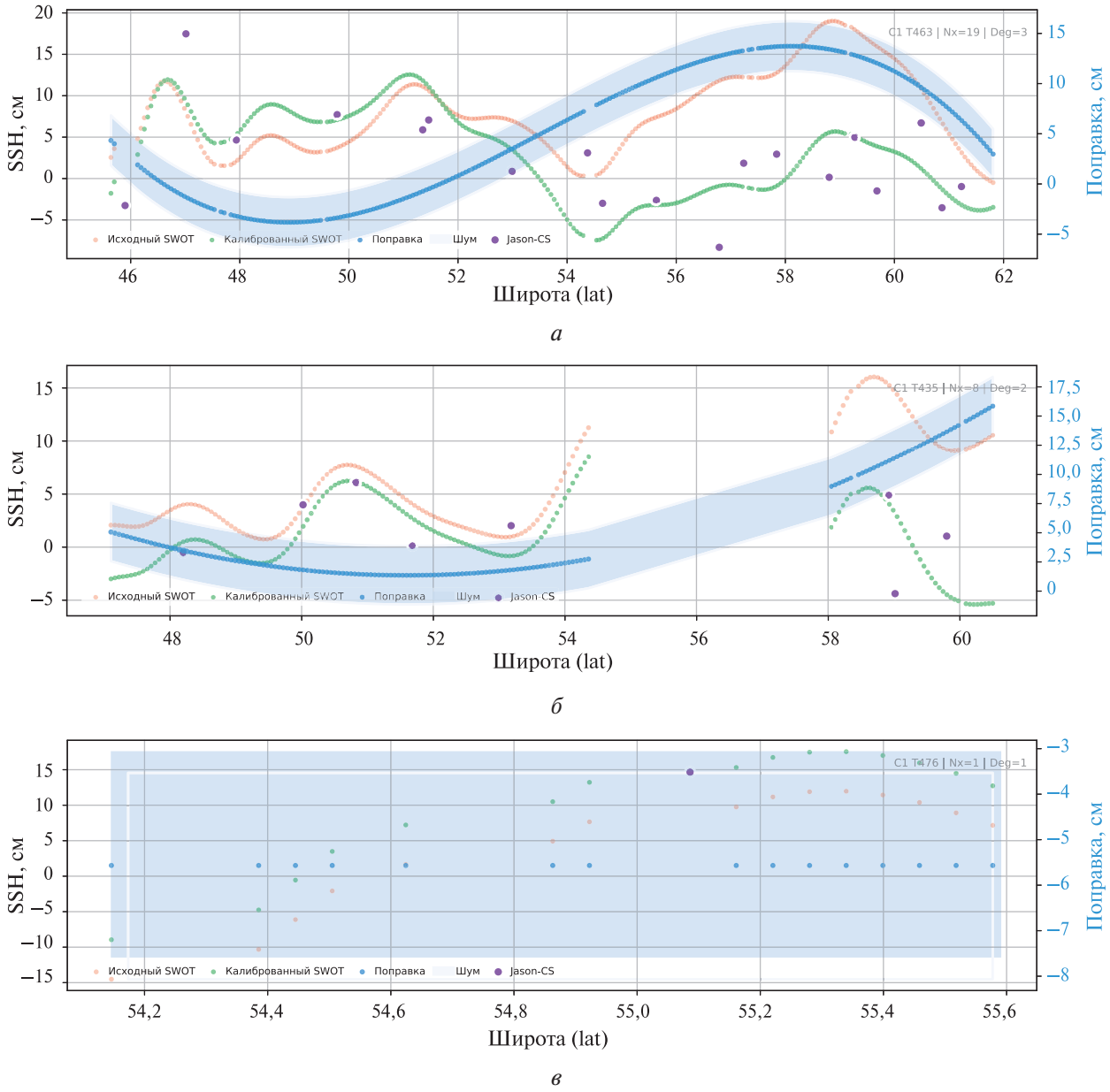


Рис. 1. Аппроксимация разности аномалий уровня океана в точках кроссоверов: *а* — полиномом третьего порядка; *б* — полиномом второго порядка; *в* — полиномом первого порядка

Используя динамическое понижение степени полинома при дефиците кроссоверов ($N_x < 6$), исключаются вычислительные выбросы в конечных точках треков, а регуляризация Тихонова подавляет краевые эффекты Рунге без искусственного расширения диапазона измерений. Наконец, ограничение степени полинома разделяет процессы по масштабам: модель физически «не замечает» локальные градиенты уровней, что предотвращает искажение мезомасштабного сигнала и позволяет изолировать исключительно длинноволновую погрешность эфемерид (Fu, 2009), защищая от ложной фильтрации параметры нелинейных вихревых полей, интенсивность которых в Мировом океане демонстрирует долгосрочный рост (Chelton et al., 2011; Martínez-Moreno et al., 2021).

Общая статистика выборок данных альтиметров SWOT и Jason-CS до и после устранения межмиссионного смещения

Для анализа, как было сказано выше, использовались две выборки космических аппаратов SWOT и Jason-CS, общее количество точек в выборках составило примерно 190 000 и 400 000 соответственно. На *рис. 2* представлено исходное распределение выборок космических аппаратов, а также распределение данных SWOT после устранения локального межмиссионного смещения.

В исходном состоянии измерения SWOT характеризуются средним значением аномалий высоты уровня моря +5,63 см, медианой +5,57 см и стандартным отклонением 7,12 см. После применения корректирующих процедур распределение информации SWOT смещается в сторону меньших значений: среднее значение снижается до +4,07 см, медиана — до +3,81 см, а стандартное отклонение уменьшается до 6,59 см. Референсное распределение Jason-CS, построенное по выборке из 436 221 точки, имеет среднее значение +3,37 см, медиану +3,45 см и стандартное отклонение 8,69 см (см. *рис. 2*).

В результате проведённой коррекции межспутниковое смещение между выборками данных SWOT и Jason-CS уменьшилось с +2,26 до +0,71 см. Изменение формы гистограммы данных SWOT (увеличение высоты модального интервала и сужение диапазона) совместно с трёхкратным снижением остаточного смещения указывает на сближение характеристик исходного ряда аномалий высоты уровня к эталонным данным референсной миссии.

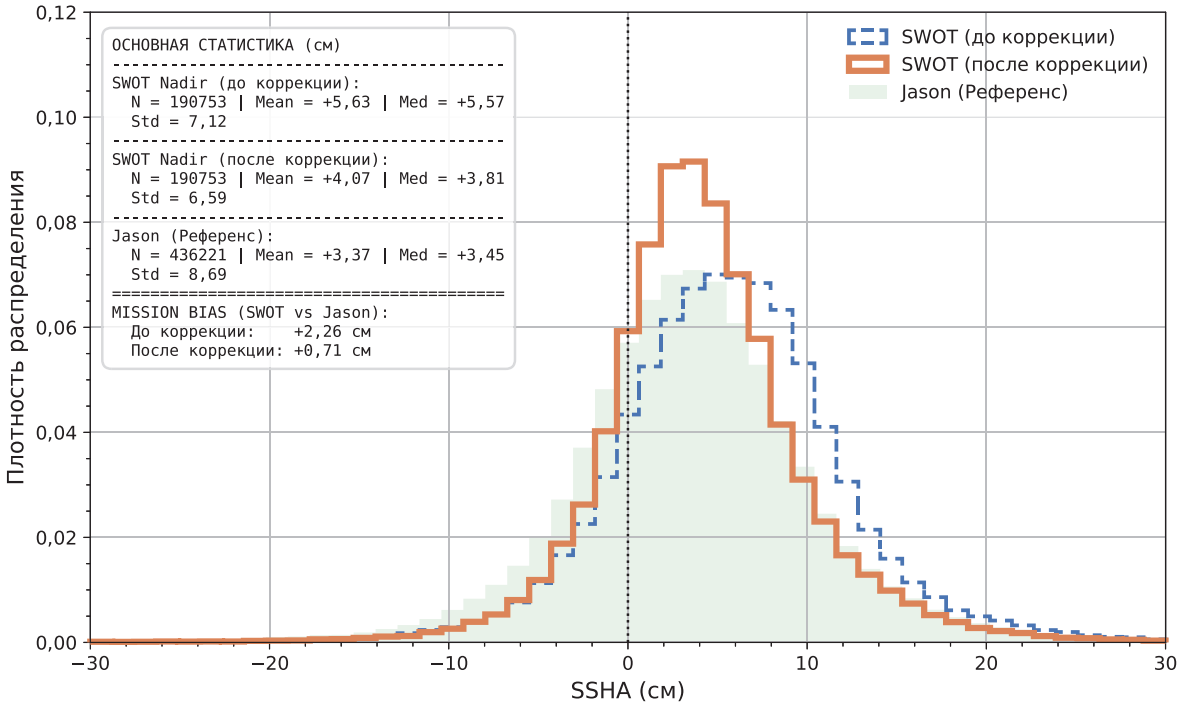


Рис. 2. Распределение исходных выборок аномалий высоты морской поверхности SSHA (*англ.* Sea Surface Height Anomalies) SWOT (до и после устранения межмиссионного смещения), а также информации Jason-CS (здесь и далее *N* — количество точек, Mean — среднее значение, Med — медиана, Std — стандартное отклонение)

Анализ кроссоверной разности до и после устранения межмиссионного смещения

Исследуем рассчитанный массив кроссоверной разности между рассматриваемыми миссиями. Всего с учётом доступных данных для региона Охотского моря была определена 12 551 точка пересечения треков космических аппаратов SWOT и Jason-CS. Сама по себе

процедура поиска пересечения треков не представляет собой особенного интереса и в рамках этой работы её описание будет опущено. В результате был получен массив значений, содержащий пространственное распределение указанной разности аномалий высот уровня моря, а также разность времени измерений спутниковых миссий в точке пересечения в привязке к циклам корректируемого космического аппарата SWOT.

Пространственное распределение средних по времени (по циклам) значений разности кроссоверов в Охотском море, а также распределение стандартного отклонения значений разности аномалий уровня моря альтиметрических миссий представлено на *рис. 3*.

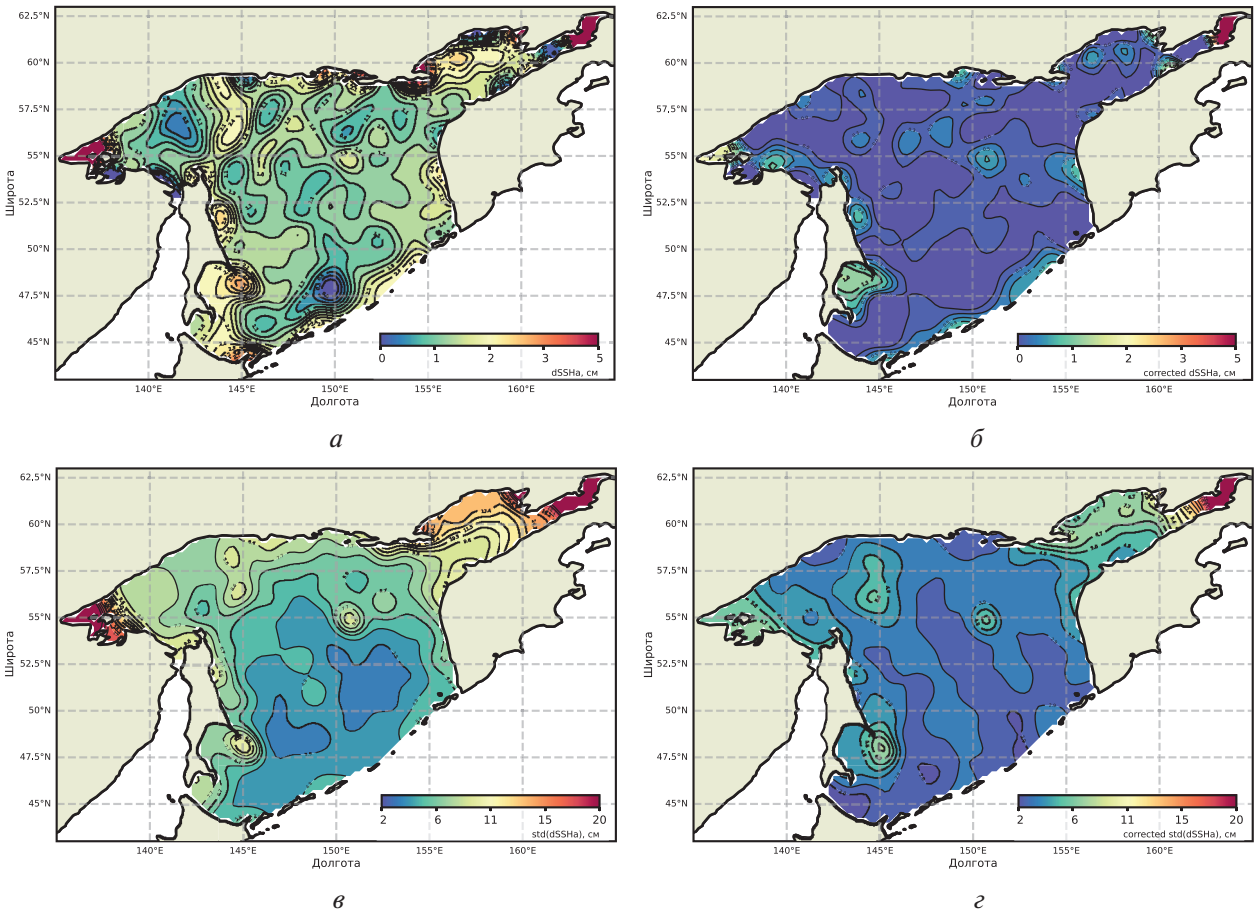


Рис. 3. Пространственное распределение средних значений разности аномалий уровня моря по данным SWOT и Jason-CS в точках пересечения треков: *а* — разность до коррекции; *б* — разность после коррекции; *в* — стандартное отклонение разности до коррекции; *г* — стандартное отклонение разности после коррекции

На представленной карте (см. *рис. 3а*) приведено пространственное распределение средней многолетней разности аномалий уровня моря dSSHa в акватории Охотского моря. Поскольку карта отражает среднемноголетний режим в точках пересечения орбит, синоптическая изменчивость, мгновенная динамика вод и случайные погрешности оказываются взаимно сглаженными. Изменчивость поля изолиний и формирование локальных градиентов в данном случае обусловлены постоянными во времени географическими и методическими особенностями проведённой обработки исходной информации.

В глубоководной центральной и восточной части бассейна (50–58° с. ш.) поле многолетней разности демонстрирует наибольшую пространственную однородность со значениями в диапазоне 1,0–1,8 см. Альтиметрические измерения показывают высокую систематическую сходимость в открытом море, где измерения и референсные поверхности (например, средняя высота морской поверхности) обладают наименьшей погрешностью.

Повышенная изменчивость со стабильным ростом среднемноголетних значений dSSHa до 2,4–3,0 см вдоль восточного побережья острова Сахалин и Курильской гряды, вероятнее всего, вызваны возможными ошибками калибровок альтиметрической информации в зонах с высокой пространственно-временной неоднородностью. Кроме того, может сказываться неполная компенсация остаточного сигнала глобальными моделями приливов.

Наиболее резкие пространственные градиенты с экстремумами свыше 4,5 см приурочены к мелководным периферийным районам — заливу Шелихова на северо-востоке и Удской губе в районе Шантарских островов на западе. Рост среднемноголетней разности, скорее всего, вызван систематическим вкладом остаточных погрешностей глобальных приливных моделей, которые в условиях экстремальных приливов на шельфе дают постоянную ошибку.

На *рис. 3в* приведено пространственное распределение стандартного отклонения разности аномалий уровня моря σ_{dSSHa}, отражающее многолетнюю изменчивость и степень рассеяния разности аномалий уровня в точках кроссоверов в акватории Охотского моря. Геометрия изолиний указывает на чёткое разделение бассейна на стабильную глубоководную часть и периферийные зоны с высоким уровнем неопределённости измерений.

В центральной и южной глубоководной части моря (в диапазоне 46–54° с. ш.) фиксируются минимальные значения стандартного отклонения, опускающиеся до уровня 2,0–4,5 см. Максимальные величины σ_{dSSHa} характеризуют мелководные прибрежные районы, где уровень изменчивости возрастает в несколько раз. В заливе Шелихова и Удской губе значения стандартного отклонения последовательно увеличиваются от 6,0 до 15,0–18,0 см. Этот экстремальный рост связан, вероятнее всего, с погрешностями работы глобальных приливных моделей в условиях сложного мелководного шельфа.

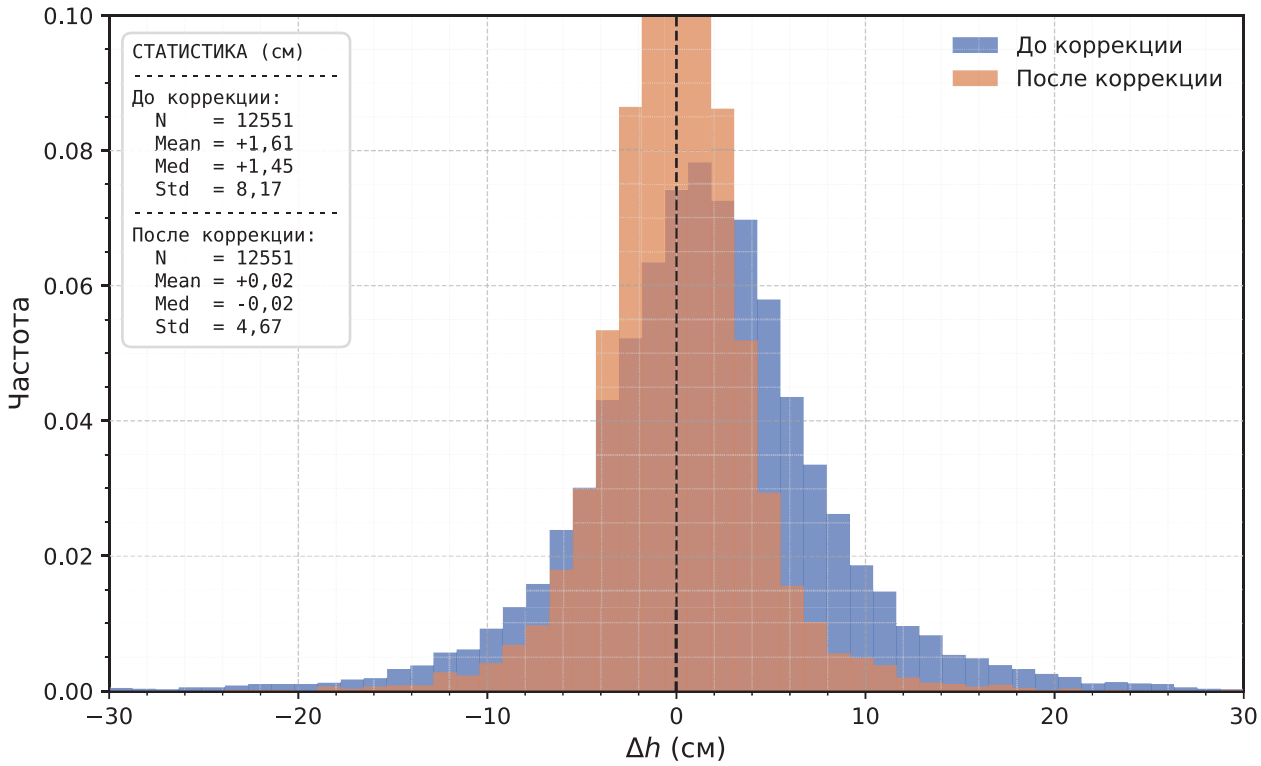


Рис. 4. Распределение разности аномалий уровня океана в точках пересечения треков космических аппаратов SWOT и Jason-CS

Введение межмиссионной поправки привело к радикальной перестройке структуры исследуемых полей, выразившейся в сглаживании пространственных градиентов и существенном снижении многолетней дисперсии остаточной разности. На карте скорректированной разности $dSSHa_{corrected}$ (см. *рис. 3б*) практически на всей акватории Охотского моря,

включая его глубоководную часть, фоновые значения минимизированы и находятся в диапазоне от 0 до 0,3 см. Соответствующее ему поле стандартного отклонения $\sigma_{\mathrm{dSSHa}_{corrected}}$ (см. *рис. 3г*) в центральной и южной части акватории также демонстрирует высокую однородность, снижаясь до минимальных значений шкалы в 2,0–3,0 см.

Значительные локальные возмущения и повышенная многолетняя изменчивость после калибровки сохраняются исключительно в динамически сложных периферийных зонах шельфа. В мелководной части залива Шелихова остаточное стандартное отклонение $\sigma_{\mathrm{dSSHa}_{corrected}}$ по-прежнему достигает экстремальных 15,0–20,0 см при значениях локальной разности $\mathrm{dSSHa}_{corrected}$ свыше 4,5 см. Менее выраженные аномалии стандартного отклонения (порядка 5,0–7,0 см) фиксируются в Удской губе, а также в Сахалинском заливе у северо-западного побережья Сахалина. Высокая многолетняя дисперсия разности в этих точках кроссоверов, по всей видимости, обусловлена нестабильностью фронтальных зон речного стока Амура и наложением ледового фактора в зимний период.

Общая статистика массива разности аномалий уровня моря в точках кроссоверов дана на *рис. 4*. Представлены гистограммы распределения разности dSSHa и $\mathrm{dSSHa}_{corrected}$ (легенда на оси абсцисс Δh) до и после процедуры коррекции. В исходном состоянии (до коррекции) распределение смещено в положительную сторону со средним значением +1,61 см и медианой +1,45 см, а также характеризуется широким разбросом данных со стандартным отклонением 8,17 см.

После применения коррекции профиль распределения трансформируется: модальный интервал существенно сужается и центрируется относительно математического нуля. Среднее значение уменьшается до +0,02 см, медиана составляет –0,02 см, а стандартное отклонение снижается до 4,67 см, что указывает на устранение значительной части дисперсии разности аномалий уровня моря.

Анализ приведённых результатов показывает, что после применения коррекции систематическое смещение разности аномалий уровня моря в точках кроссоверов практически полностью устранено, о чём свидетельствует приближение среднего значения и медианы к нулевой отметке, а также снижение стандартного отклонения в 1,75 раза.

Анализ временной изменчивости разности кроссоверов

Анализ временной динамики средней (по пространству) разности аномалий высоты моря в точках кроссоверов в зависимости от номера цикла миссии SWOT (*рис. 5а*) выявил высокую межциклической нестабильность исходного ряда данных, именно поэтому было принято решение провести процедуру локального устранения межмиссионного смещения. Среднее смещение для большинства циклов изменяется в диапазоне от +1 до +4 см, демонстрируя резкий положительный пик на 11–13-м циклах (до +4,5 см) и глубокий провал на 15-м цикле (до –2,8 см). Сопоставление с нижней гистограммой количества точек кроссоверов на каждом цикле N_x (см. *рис. 5б*) показывает, что экстремальный разброс значений и максимальное расширение 95%-го доверительного интервала на промежутке с 10-го по 16-й цикл напрямую обусловлены значительным дефицитом данных, вызванным, вероятнее всего, жёсткой технической отбраковкой зашумлённых измерений в ледовый период.

Введение межмиссионной поправки привело к практически полному устранению межциклической изменчивости и стабилизации разности на всём временном интервале наблюдений. На протяжении всех 44 циклов среднее смещение устойчиво удерживается в субмиллиметровом диапазоне вокруг нулевой отметки, не превышая по абсолютной величине 0,3 см, за исключением незначительного локального всплеска до +1,0 см на 11-м цикле. Доверительные интервалы после коррекции сузились и стали однородными по всей временной шкале, что подтверждает устойчивость алгоритма даже в условиях экстремального дефицита измерений.

На *рис. 5б* хорошо наблюдается сезонный ход, к сожалению, за счёт неблагоприятной ледовой обстановки существенно снижается количество исходных альтиметрических дан-

ных в Охотском море: практически двукратное падение для 11–12-го и 29–30-го циклов, данные для 15-го (частично) и 16-го (практически полностью) отсутствовали в массиве SWOT_L2_NALT_GDR_SSHA_2.0.

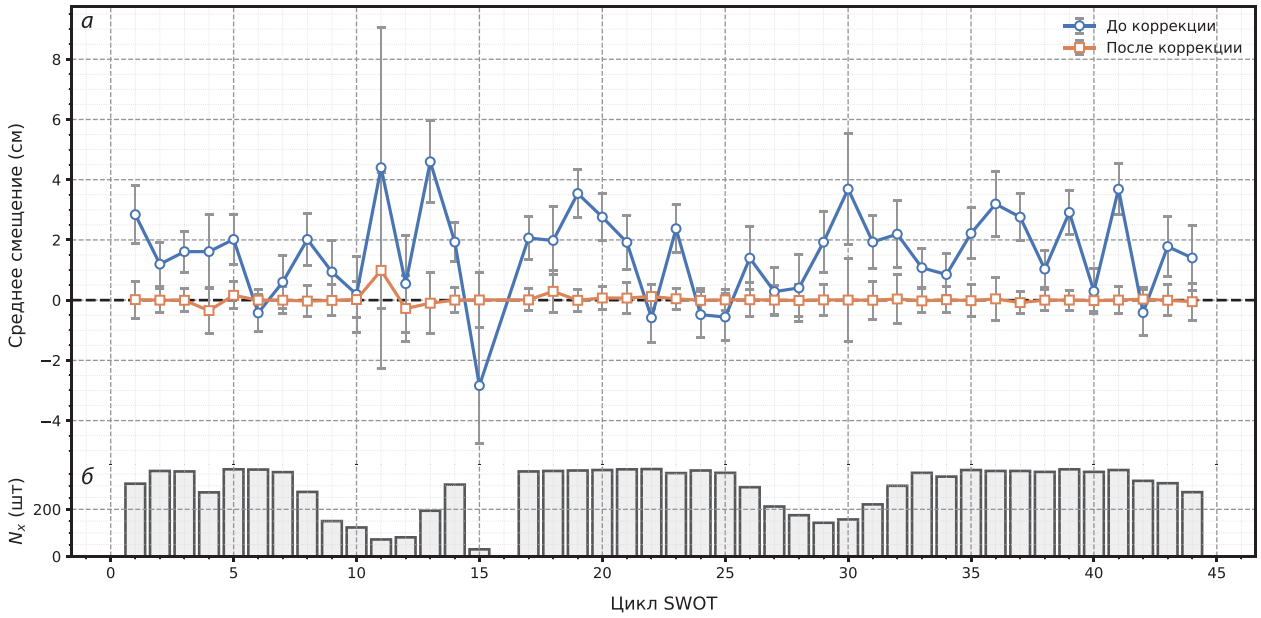


Рис. 5. Временной ход: *а* — средней разности в точках пересечений треков; *б* — количества кроссоверов N_x

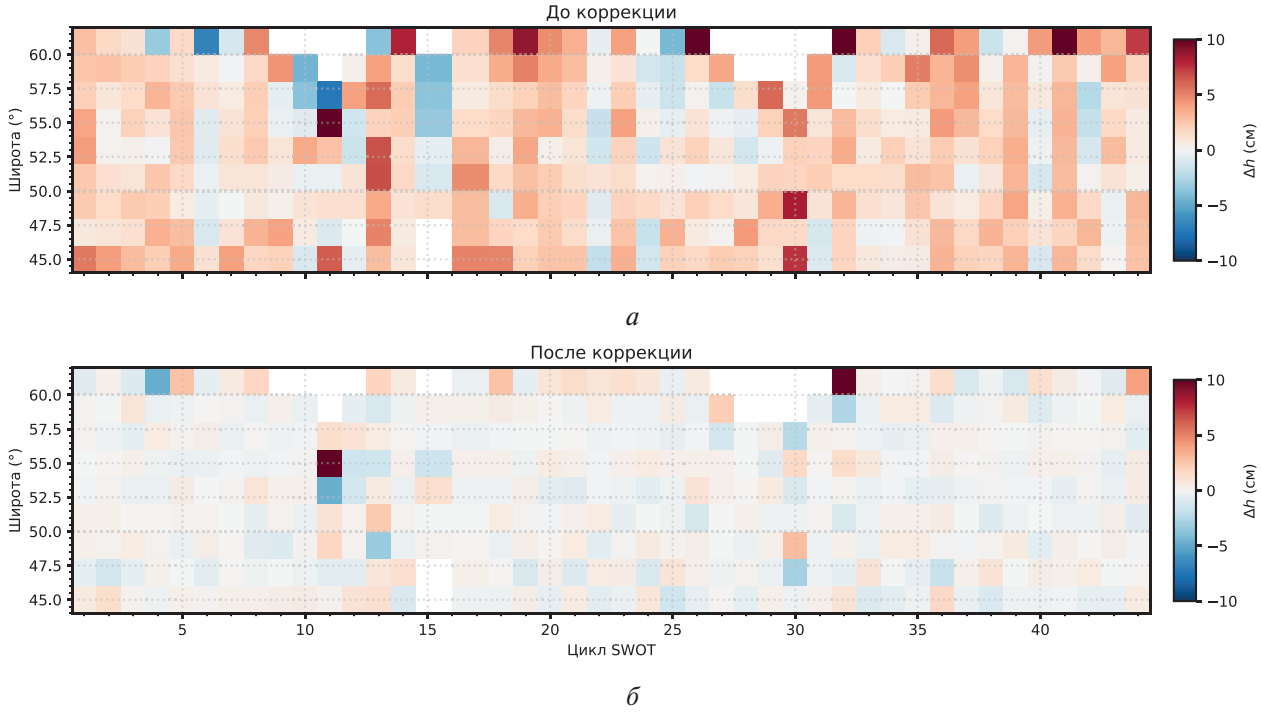


Рис. 6. Диаграмма Ховмюллера с учётом осуществления процедуры межмиссионного смещения: *а* — до коррекции; *б* — после коррекции

Двумерное широтно-временное распределение (диаграмма Ховмюллера) позволяет детально оценить структуру разности $\Delta h = \mathrm{dSSHa} - \mathrm{dSSHa}_{corrected}$ по параллелям Охотского моря (*рис. 6*). На диаграмме до коррекции (см. *рис. 6а*) отчётливо прослеживается широтная

зональность: если в южной части моря поле относительно стабильно, то в высоких широтах (выше 57° с. ш.) изменчивость резко возрастает, формируя регулярные экстремальные аномалии (бордовые пиксели). На развёртке также видны сквозные вертикальные полосы на 11, 15, 16 и 30-м циклах, отражающие фактически отсутствие данных, а в районе 55–57° с. ш. на интервале 10–14-го циклов фиксируется резкая изменчивость с перепадами значений от –10 до +10 см.

После устранения локального межмиссионного смещения широтно-временное распределение на диаграмме Ховмюллера радикально выравнивается, трансформируясь в однородный околонулевой фон (см. *рис. 6б*). Статистический анализ пикселей развёртки показал, что после коррекции 93,4 % всех точек диаграммы перешло в узкий диапазон ошибок ±1 см (против 24,1 % в исходном состоянии), при этом 81,5 % всех значений сконцентрировалось в пределах ±0,5 см. Сохранение единичных изолированных очагов повышенной дисперсии (например, на 32-м цикле выше 60° с. ш.) носит строго локальный характер и определяется значениями разности Δh в прибрежной зоне залива Шелихова.

Таким образом, комплексный анализ временных рядов и диаграмм Ховмюллера подтверждает эффективность предложенной методики устранения межмиссионного смещения для акватории Охотского моря. Применённая поправка эффективно компенсирует как постоянный многолетний сдвиг, так и резкие кратковременные флуктуации, возникающие по причине орбитальных или аппаратурных ошибок. Численные результаты перераспределения погрешностей по диапазонам наглядно доказывают успешность калибровки: доля данных, укладывающихся в интервал ±0,5 см, увеличилась более чем в 7 раз (с 11,2 до 81,5 %), в то время как присутствие грубых экстремальных выбросов свыше ±5,0 см было сведено к минимуму и составило всего 0,8 %.

Заключение

В рамках проведённого исследования выполнена оценка межмиссионного смещения альтиметрических данных спутников SWOT (надирный альтиметр) и Jason-CS для акватории Охотского моря. Анализ пространственно-временной изменчивости распределения разности аномалий уровня моря в точках кроссоверов — dSSHa, совмещённый с расчётом комплексных статистических критериев по выборке из 12 551 точки, позволил количественно оценить масштаб устранённых систематических и случайных погрешностей.

Сводный анализ среднемноголетних пространственных полей до коррекции выявил выраженную неоднородность остаточной разности. Повышенные значения (2,4–3,0 см) вдоль побережья Сахалина и Курильской гряды вызваны возможными ошибками калибровок альтиметрической информации в зонах с высокой пространственно-временной неоднородностью, а также может сказываться неполная компенсация остаточного сигнала глобальными приливными моделями. Наиболее существенные пространственные градиенты с многолетним стандартным отклонением до 15–20 см локализованы в мелководных заливах (залив Шелихова, Удская губа), что обусловлено постоянным вкладом остаточных ошибок глобальных приливных моделей в условиях экстремальных шельфовых приливов и флуктуациями речного стока.

Применение предложенной методики устранения локальной межмиссионной поправки для акватории Охотского моря привело к сглаживанию пространственных градиентов и выравниванию среднемноголетнего фона до субсантиметрового уровня (0,0–0,3 см). Временной анализ по циклам миссии и широтно-временным распределениям (диаграммы Ховмюллера) подтвердил долговременную стабильность алгоритма: сквозные вертикальные аномалии (в частности, на 11-м и 30-м циклах) не оказывают существенного влияния, а среднее по времени смещение стабилизировалось около нуля даже при условии существенного дефицита исходных данных ($N_x < 50$) для циклов, содержащих малое число исходных измерений вследствие «ледовой» отбраковки. В конечном счёте, 81,5 % значений диаграммы сконцентрировалось в пределах ±0,5 см.

Эффективность предложенной методики подтверждается интегральными статистическими метриками и результатами параметрических и непараметрических тестов. Систематическое смещение между двумя массивами данных космических аппаратов SWOT и Jason-CS практически полностью устранено, снизившись с первоначальных +1,61 до +0,02 см (медиана сместилась с +1,45 до −0,02 см). Результаты парного *t*-теста: $t = 0{,}3664$, $p = 0{,}7140$ (p — достигнутый уровень значимости), указывают на статистическую неотличимость полученного после коррекции среднего значения от математического нуля.

Среднеквадратическая ошибка RMSE (*англ*. Root Mean Square Error) уменьшилась на 43,9 % (с 8,32 до 4,67 см), полностью сравнявшись со значением стандартного отклонения, что свидетельствует об исключении систематической компоненты из общего бюджета ошибок. Значение метрики медианного абсолютного отклонения MAD (*англ*. Median Absolute Deviation) сократилось почти вдвое — с 5,35 до 2,86 см. Значимый результат *F*-теста на равенство дисперсий $F = 3{,}0643$, $p = 1{,}11 \cdot 10^{-16}$ строго подтверждает статистически достоверное снижение рассеяния калибруемого ряда.

Граница 95%-го доверительного интервала абсолютных ошибок сузилась с 15,17 до 8,28 см, что указывает на эффективное стягивание основного объёма измерений к центру. При этом зафиксирован рост асимметрии (с 1,56 до 1,85) и резкое увеличение эксцесса (с 44,29 до 71,66). Такое обострение пика распределения показывает, что подавляющее большинство данных выборки разности в кроссоверах сконцентрировалось в узкой околонулевой зоне, а оставшаяся часть дисперсии формирует изолированные «тяжёлые хвосты». Результат парного критерия Уилкоксона $W = 2{,}61 \cdot 10^{7}$, $p = 4{,}84 \cdot 10^{-234}$ отвергает гипотезу о случайности внесённых изменений и доказывает наличие статистически достоверного сдвига центра распределения, подтверждая детерминированный, а не случайный характер работы предложенной методики.

Сохраняющиеся после калибровки локальные экстремумы среднеквадратического отклонения разности аномалии высоты поверхности моря в вершине залива Шелихова носят изолированный характер и обусловлены, по всей видимости, локальными мелководными эффектами и ограничениями современных глобальных приливных моделей в околобереговой зоне.

Литература

1. *Романов А.А.*, *Романов А.А.* Основные параметры модели мезомасштабной изменчивости Охотского моря по данным спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 233–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-233-243.
2. *Chelton D. B.*, *Ries J. C.*, *Haines B. J. et al.* Ch. 1. Satellite altimetry // V. 69: Satellite altimetry and Earth sciences: A handbook of techniques and applications / eds. L.-L. Fu, A. Cazenave. Academic Press, 2001. P. 1–131. DOI: 10.1016/S0074-6142(01)80146-7.
3. *Chelton D. B.*, *Schlax M. G.*, *Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography. 2011. V. 91. No. 2. P. 167–216. DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
4. *Fu L.-L.* Patterns and velocity of propagation of the global ocean eddy variability // J. Geophysical Research: Oceans. 2009. V. 114. No. C11. Article C11017. DOI: 10.1029/2009JC005349.
5. *Fu L.-L.*, *Pavelsky T.*, *Cretaux J.-F. et al.* The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water // Geophysical Research Letters. 2024. V. 51. No. 4. Article e2023GL107652. DOI: 10.1029/2023GL107652.
6. *Jacobs G. A.*, *Barron C. N.*, *Rhodes R. C.* Mesoscale characteristics // J. Geophysical Research: Oceans. 2001. V. 106. No. C9. P. 19581–19595. DOI: 10.1029/2000JC000669.
7. *Le Traon P.-Y.*, *Ogor F.* (1998a) ERS-1/2 orbit improvement using TOPEX/Poseidon: The 2 cm challenge // J. Geophysical Research: Oceans. 1998. V. 103. No. C4. P. 8045–8057. DOI: 10.1029/97JC01917.
8. *Le Traon P. Y.*, *Nadal F.*, *Ducet N.* (1998b) An improved mapping method of multisatellite altimeter data // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 1998. V. 15. P. 522–534. DOI: 10.1175/1520-0426(1998)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2.
9. *Martínez-Moreno J.*, *Hogg A. M.*, *England M. H. et al.* Global changes in oceanic mesoscale currents over the satellite altimetry record // Nature Climate Change. 2021. V. 11. No. 3. P. 397–403. DOI: 10.1038/s41558-021-01006-9.

10. *Tikhonov A. N.* Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method // Soviet Mathematics Doklady. 1963. V. 4. No. 4. P. 1035–1038.
11. *Tikhonov A. N.*, *Arsenin V. Y.* Solutions of ill-posed problems. N. Y., Washington D. C.: W. H. Winston and Sons, 1977. 258 p.
12. *Wunsch C.* Discrete inverse and state estimation problems: With geophysical fluid applications. Cambridge University Press, 2009. 371 p. DOI: 10.1017/CBO9780511535949.

Method for calculating the SWOT intermission bias relative to Jason-CS for the Sea of Okhotsk

A. A. Romanov, A. A. Romanov[1]

Moscow Institute of Physics and Technology
Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russia
E-mails: romulas@mail.ru, aaromanov@tsniimash.ru

Over their period of continuous operation, the TOPEX/Poseidon (Topographic Experiment/ Poseidon) altimetry mission and its successors, Jason-1/2/3/CS, have accumulated a significant volume of altimetry data for the global ocean. The recent launch of the new SWOT (Surface Water and Ocean Topography) spacecraft has expanded the capabilities for studying mesoscale variability; however, practical application of SWOT nadir altimeter data in conjunction with Jason-CS data for regional basins, such as the Sea of Okhotsk, is challenging without eliminating the local intermission bias. Within the framework of this study, an analysis was performed using a dataset from the SWOT traditional altimeter and the corresponding Jason-CS sample for the 2023–2026 period. A methodology is proposed to eliminate the local intermission bias based on reference data from the Jason-CS satellite. An adaptive algorithm utilizing Tikhonov regularization implements a bias calculation that is robust against data deficits. As a result of applying the proposed methodology, the systematic bias between the data samples decreased from +2.26 to +0.71 cm, and the root-mean-square error at crossover points was reduced by 43.9 %.

Keywords: satellite altimetry, Sea of Okhotsk, regional intermission bias elimination methodology, SWOT, Jason-CS

Accepted: 24.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-9-21

References

1. Romanov A. A., Romanov A. A., Main parameters of a mesoscale variability model of the Sea of Okhotsk based on satellite altimetry data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 2, pp. 233–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-233-243.
2. Chelton D. B., Ries J. C., Haines B. J. et al., Ch. 1. Satellite altimetry, In: *V. 69: Satellite altimetry and Earth sciences: A handbook of techniques and applications*, L.-L. Fu, A. Cazenave (eds.), Academic Press, 2001, pp. 1–131, DOI: 10.1016/S0074-6142(01)80146-7.
3. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, V. 91, No. 2, p. 167–216, DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
4. Fu L.-L., Patterns and velocity of propagation of the global ocean eddy variability, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2009, V. 114, No. C11, Article C11017, DOI: 10.1029/2009JC005349.
5. Fu L.-L., Pavelsky T., Cretaux J.-F. et al., The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water, *Geophysical Research Letters*, 2024, V. 51, No. 4, Article e2023GL107652, DOI: 10.1029/2023GL107652.
6. Jacobs G. A., Barron C. N., Rhodes R. C., Mesoscale characteristics, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2001, V. 106, No. C9, pp. 19555–19565, DOI: 10.1029/2000JC000669.
7. Le Traon P.-Y., Ogor F. (1998a), ERS-1/2 orbit improvement using TOPEX/Poseidon: The 2 cm challenge, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1998, V. 103, No. C4, pp. 8045–8057, DOI: 10.1029/97JC01917.

8. Le Traon P. Y., Nadal F., Ducet N. (1998b), An improved mapping method of multisatellite altimeter data, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, V. 15, pp. 522–534, DOI: 10.1175/1520-0426(1998)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2.
9. Martínez-Moreno J., Hogg A. M., England M. H. et al., Global changes in oceanic mesoscale currents over the satellite altimetry record, *Nature Climate Change*, 2021, V. 11, No. 3, pp. 397–403, DOI: 10.1038/s41558-021-01006-9.
10. Tikhonov A. N., Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method, *Soviet Mathematics Doklady*, 1963, V. 4, No. 4, pp. 1035–1038.
11. Tikhonov A. N., Arsenin V. Y., *Solutions of ill-posed problems*, New York, Washington D. C.: W. H. Winston and Sons, 1977, 258 p.
12. Wunsch C., *Inverse and state estimation problems: With geophysical fluid applications*, Cambridge University Press, 2009, 371 p, DOI: 10.1017/CBO9780511535949.