



Методика калибровки высокоточного радиовысотомера (альтиметра) с использованием геоинформационного мониторинга

Н.Н. Яковлев¹✉

¹ Научно-исследовательский и проектный институт градостроительства, Реутов, Россия
✉ yakovlevnn@niipi.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Яковлев Н.Н. Методика калибровки высокоточного радиовысотомера (альтиметра) с использованием геоинформационного мониторинга // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 1. С. 10–22. DOI:10.30533/GiA-2025-001.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА гравитационное поле, космическая геодезическая система, спутниковый альтиметр, внешняя калибровка, высота поверхности моря

АННОТАЦИЯ Высокая точность альтиметрических измерений космических геодезических систем достигается путем учета погрешностей распространения электромагнитного сигнала в атмосфере, инструментальных погрешностей альтиметра и погрешностей, обусловленных динамикой водной поверхности. Важным мероприятием, позволяющим оценить результаты измерений, является калибровка альтиметра. Многолетний опыт эксплуатации отечественных и зарубежных альтиметрических миссий показывает, что калибровка выступает одним из ключевых условий надежной оценки параметров гравитационного поля Земли. В статье рассмотрены вопросы совершенствования существующего методического аппарата калибровки альтиметра путем интеграции методов использования глобальных навигационных спутниковых систем с современными достижениями в области геоинформатики. Целью совершенствования методики является минимизация влияния трудно учитываемого фактора — динамической топографии морской поверхности — на точность определения калибровочной поправки. В работе предложены варианты модернизации средств технического обеспечения калибровки, уточнена стратегия набора измерительной информации, разработанная ранее. Обоснован состав и характер размещения измерительных систем на морской поверхности. Разработаны основные положения определения эталонной высоты морской поверхности с использованием геоинформационного мониторинга. В работе рассмотрен алгоритм геоинформационного моделирования фактической морской поверхности с использованием полиномиального сглаживания. Приведены результаты экспериментальных исследований разработанной методики.

1 Введение

При калибровке высокоточного радиовысотомера (ВРВ) космической геодезической системы (КГС) современными средствами возникает необходимость сбора, хранения, обработки и оценки пространственных данных различного рода, а также их трансформаций во времени.

В общем виде калибровка ВРВ состоит из нескольких этапов обработки пространственных данных [1–5]. В первую очередь успех проведения калибровки опирается на результаты обоснования и выбора морской акватории для проведения измерений, а также выбора мест размещения береговых измерительных систем (ИС) полигона калибровки ВРВ, вспомогательных технических средств и их геодезической привязки. Вторым этапом обработки пространственных данных становится выполнение баллистических расчетов прохождения космического аппарата (КА) геодезического назначения над морской акваторией, определяющих предварительное положение подспутниковых точек, в которых выполняются измерения превышения КА над морской поверхностью. Следующим этапом является определение оптимальной конфигурации размещения ИС на морской поверхности для получения измерительной информации на основании выполненных баллистических расчетов прохождения КА геодезического назначения над морской акваторией. Последний этап по порядку, но не последний по объему пространственных данных – это обработка измерительной информации с целью определения эталонного значения высоты мгновенной средней поверхности моря (МСПМ) для расчета калибровочной поправки.

На сегодняшний день наиболее сложным с технической точки зрения из всех перечисленных представляется последний этап – этап определения эталонной высоты МСПМ. Сложность определений высоты МСПМ объясняется труднопредсказуемым поведением морской поверхности, обусловленным влиянием возмущающих факторов. К числу последних следует отнести влияние вертикальных и горизонтальных течений, атмосферы (ветровое воздействие и атмосферное давление), изменение солености морской воды, а также приливы и отливы¹. Экспериментальные исследования калибровки ВРВ отечественной КГС с использованием измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) показали, что погрешность определения калибровочной поправки значительным образом зависит от аномалии динамической топографии² морской поверхности [6].

Предметом исследований, рассмотренных в данной статье, является совершенствование методики калибровки ВРВ в части учета влияния динамической топографии с использованием одного из инструментов геоинформатики – геоинформационного мониторинга.

2 Материалы и методы

2.1 Геоинформационная модель физической морской поверхности

Физическая морская поверхность – сложная динамическая форма, образуемая влиянием гравитационного поля Земли и возмущающих факторов. Условную

¹ Деев М.Г. Уровень как индикатор изменений состояния Мирового океана. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://geo.isept.ru/view_article.php?ID=201000604 (дата обращения: 25.09.2023).

² При проведении калибровки ВРВ под аномалией динамической топографии понимается величина отклонения физической поверхности моря от его среднего положения (средней динамической топографии), определенного по результатам многолетних наблюдений.

сферическую поверхность с центром в центре масс Земли, проведенную в границах заданной акватории на момент измерения ВРВ так, что объем гребней волн над поверхностью равен объему впадин между гребнями под ней, принято называть мгновенной средней поверхностью моря. Радарный метод измерения высоты физической морской поверхности, применяемый в спутниковой альтиметрии, позволяет по единичному измерению ВРВ получить интегральное значение высоты МСПМ на заданной площади с учетом объема гребней волн и объема впадин между гребнями под ней. Совершенно очевидно, что в каждой подспутниковой точке получить значение высоты МСПМ иными, отличными от радарного, способами не представляется возможным. Существующая методика калибровки ВРВ [6] предполагает измерение высоты МСПМ с использованием эталонной ИС вблизи подспутниковой трассы и редукцию измерений в подспутниковые точки с использованием модели геоида и средней динамической топографии. Экспериментальные исследования показали, что при использовании методики значения калибровочной поправки могут содержать систематические погрешности, величина которых зависит от величины аномалий динамической топографии, их пространственного распределения и взаимного пространственного положения точек размещения эталонных ИС и подспутниковых точек.

Для устранения влияния аномалий динамической топографии предлагается определение эталонной высоты МСПМ при калибровке ВРВ выполнять с использованием информационной модели морской поверхности. Работа с информационной моделью позволит получить результаты анализа или прогноз изменения значения какого-либо параметра МСПМ, если из-за обстоятельств это невозможно сделать иными способами.

Под информационной моделью в работе понимается формализованное отображение существующего объекта или системы объектов с помощью совокупности взаимосвязанных, идентифицируемых, информационно определяемых параметров, отображающих наиболее существенные свойства, связи и отношения объекта моделирования [7]. В ситуации с моделированием МСПМ целесообразно воспользоваться особой формой информационной модели — геоинформационной моделью. Спецификой геоинформационной модели является ее построение на основе анализа пространственных данных и связей между ними, реализуемых с использованием геоинформационных систем (ГИС), баз пространственных данных (БД) и систем управления этими базами данных (СУБД). В процессе формирования геоинформационной модели необходимо выполнить сбор, обработку и интеграцию пространственных данных различного вида, полученных на заданном интервале времени, их пространственную локализацию с последующей визуализацией и возможность пространственного анализа. В научной литературе интегрированная технология, объединяющая разные методы и механизмы сбора, обработки и анализа пространственных данных, получила название геоинформационного мониторинга [8].

В рамках проводимых исследований геоинформационный мониторинг следует рассматривать как технологию наблюдения за динамикой физической морской поверхности с целью описания ее пространственного положения в заданное время. Такой подход позволит наиболее полно получить значение высоты в любой точке этой поверхности.

Для построения геоинформационной модели физической морской поверхности представляется целесообразным воспользоваться подходом, описанным в [6] и базирующимся на следующих положениях:

- в течение времени, соответствующего единичному измерению превышения ВРВ, физическую морскую поверхность можно признать статической, причем как в отношении долгопериодических (например, приливные эффекты), так и короткопериодических (ветровое волнение) возмущающих факторов;
- для построения геоинформационной модели статической поверхности достаточно получить значения высоты в нескольких точках поверхности с двумя условиями: количество таких точек должно обеспечивать

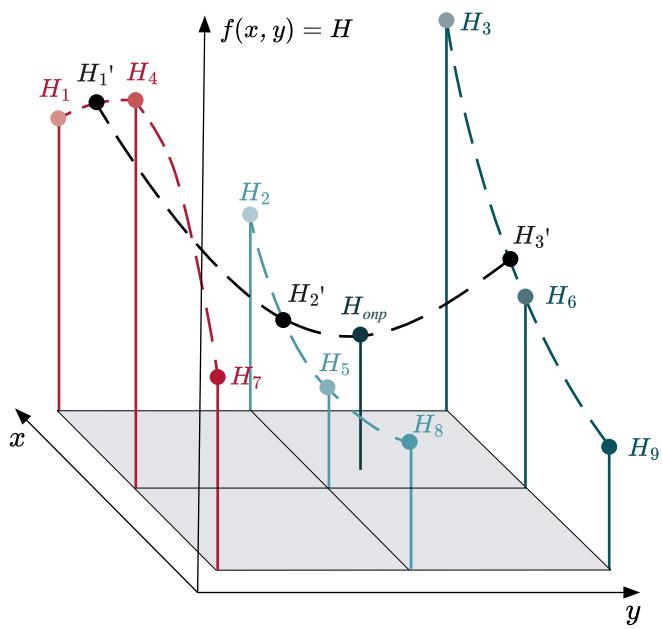
- возможность реализации математического аппарата моделирования поверхности в заданных границах и значения высоты в этих точках не должны быть искажены влиянием короткопериодических возмущающих факторов (гребнями и впадинами волны);
- влияние короткопериодических возмущающих факторов в точках определения высоты может быть устранено путем осреднения параметров волнения, что требует получения достаточного количества измерительной информации.

Рис. 1

Схема биквадратной сплайн-интерполяции

Fig. 1

Scheme of biquadratic spline interpolation



Геоинформационная модель физической морской поверхности на любой момент времени в пределах интервала измерений представляет собой совокупность значений эталонной высоты в точках размещения ИС и математических зависимостей, позволяющих рассчитывать высоту в любой произвольной точке акватории калибровки.

Для построения информационной модели МСПМ в качестве математической зависимости целесообразно использование метода биквадратной сплайн-интерполяции. Это метод интерполяции в трехмерном пространстве, при котором неизвестные значения функций аппроксимируются в искомых точках полиномами второй степени в соответствии с известными значениями в окружающих девяти точках. Предполагается, что искомые точки лежат внутри четырех четырехугольников, граничащих друг с другом двумя ребрами и сформированных девятью известными точками [9]. При этом для определения значения высоты в произвольной точке поверхности, проходящей через девять точек, необходимо определить значения коэффициентов трех полиномов второй степени по одной из осей координат, например x , и одного — по второй оси, y (рис. 1).

Коэффициенты a, b, c для полинома под номером i по оси x находятся, например, из системы уравнений

1

$$\begin{cases} a_i + b_i x_i + c_i x_i^2 = H_i, \\ a_i + b_i x_{i+3} + c_i x_{i+3}^2 = H_{i+3}, \\ a_i + b_i x_{i+6} + c_i x_{i+6}^2 = H_{i+6}, \end{cases}$$

а коэффициенты d, f, g для полинома по оси y вычисляются из системы уравнений

2

$$\begin{cases} d + f y + g y^2 = H_1', \\ d + f y + g y^2 = H_2', \\ d + f y + g y^2 = H_3', \end{cases}$$

где x, y — плоские прямоугольные координаты точек с известными значениями высот; H — значение высоты МСПМ в точке в соответствии со схемой на рис. 1.

Геоинформационная модель МСПМ, построенная на заданный момент времени с использованием биквадратной сплайн-интерполяции, позволяет выполнить расчет высоты МСПМ в узлах регулярной сетки с заданной плотностью или в заданной точке и является описанием поверхности, которая служит отражающей поверхностью для сигнала ВРВ. При этом расчет высоты МСПМ в подспутниковой точке в пределах границ информационной модели свободен от влияния погрешностей модели геоида и динамической топографии. Создание геоинформационной модели физической морской поверхности методом сплайн-интерполяции может быть реализовано с использованием ГИС, БД и СУБД.

Условия создания геоинформационной модели, описанные выше, требуют пересмотра стратегии набора измерительной информации, рассмотренной в [6], в части формирования массивов измерительной информации.

2.2 Формирование массивов измерительной информации

Из основных положений биквадратной сплайн-интерполяции следует, что для калибровки ВРВ методом геоинформационного мониторинга в морской акватории должна быть развернута сеть из девяти волномерных буев (ВБ), оснащенных ГНСС-приемниками, в виде квадрата (рис. 2) вблизи наземного пункта наблюдений (НПН). С использованием вспомогательных якорных средств обеспечивается условно-статическое положение ВБ (дрейф в ограниченном пространстве). Для наиболее полного учета возмущающих факторов набор измерительной информации начинается не позднее чем за час и прекращается не ранее чем через час после прохождения КА геодезического назначения или группы таких КА.

Следует отметить, что скорость КА геодезического назначения³, оборудованного ВРВ, на орбите с высотой порядка 1000 км составляет около 6,5 км/с (в проекции на поверхность моря). Следовательно, для акватории протяженностью порядка 10–12 км разность времени между первым и последним измерением не будет превышать 2 с. Для расчета калибровочной поправки целесообразно использовать измерения ВРВ с частотой 20 Гц и значение калибровочной поправки определить по 20–40 измерениям.

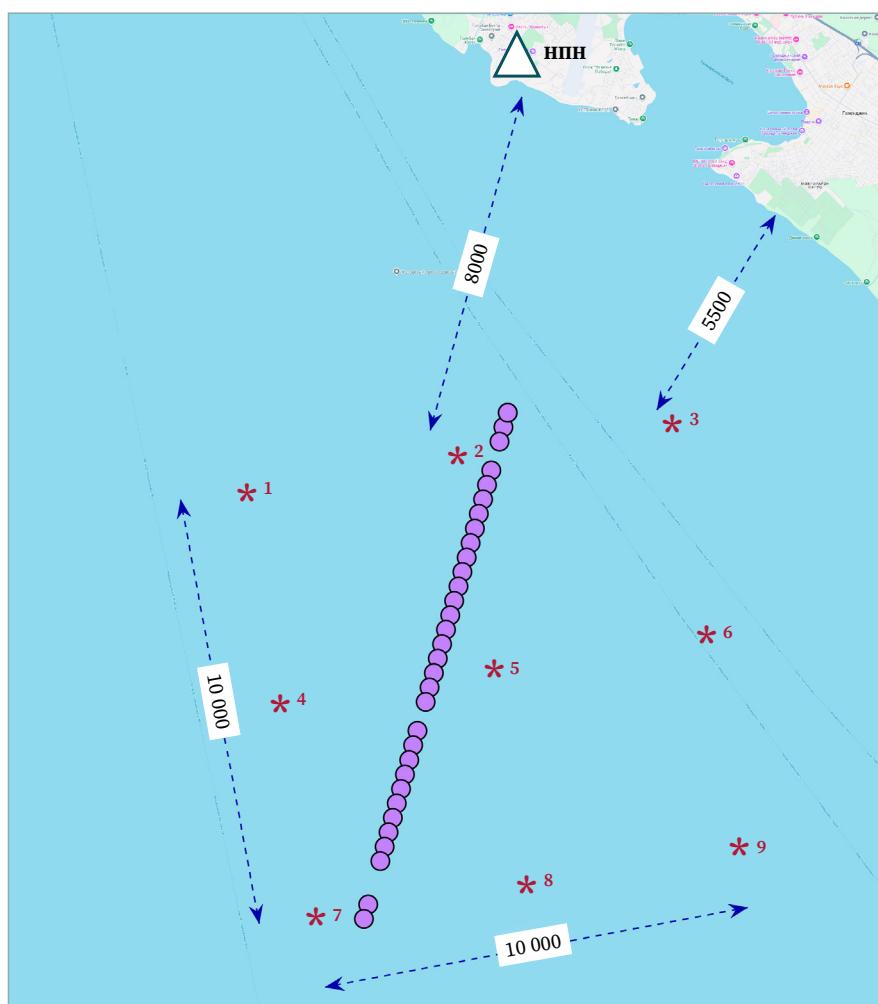
Формирование массивов измерительной информации ВБ осуществляется в соответствии со следующими положениями. В первую очередь выполняется

Рис. 2

Схема размещения ВБ
Fig. 2
Wave buoy location diagram

Условные обозначения

- * Место размещения ВБ
- Подспутниковая точка
- № Номер ВБ



³ Космический аппарат «ГЕО-ИК-2». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-geodesy/geo-ik2> (дата обращения: 23.08.2024).

определение интервала осреднения высокочастотных колебаний для ВБ, расположенного в центре сети. Осреднение колебаний осуществляется на начальном интервале сглаживания, равном 30 с. Серединой начального интервала сглаживания выбирается среднее время сеанса, которое вычисляется как среднее арифметическое времени первого и последнего измерения ВРВ в границах сети ВБ. На начальном интервале определяется высота МСПМ, равная среднему арифметическому высот ВБ на интервале, а также определяются средние значения координат положения ВБ (x и y) в плоской прямоугольной системе координат (например, ГСК-2011). Далее анализируется изменение высоты МСПМ с увеличением длины начального интервала осреднения с заданным смещением, равным 1 с. влево и вправо от выбранного среднего времени сеанса. При изменении высоты МСПМ меньше заданной величины фиксируется оптимальный интервал осреднения. На оптимальном интервале осреднения выполняется расчет высоты МСПМ для каждого ВБ на всем интервале измерений.

Физически для каждого ВБ создаются свои массивы средних значений высоты МСПМ, но при этом номера интервалов осреднения и время их начала должны совпадать (одинаковый номер интервала осреднения для каждого ВБ относится к одному и тому же среднему времени сеанса). Полученные массивы измерительной информации ВБ могут быть использованы для калибровки другого КА КГС в случае размещения его на калибровочном типе орбиты с учетом разницы времени прохождения над акваторией калибровки между КА.

2.3 Расчет калибровочной поправки

Расчет калибровочной поправки и определение неоднозначности выполняется в соответствии с положениями, указанными в [6]. При этом расчет эталонного значения высоты в каждой подспутниковой точке ($H_{MSPM-ET}$) выполняется с использованием геоинформационной модели МСПМ.

3 ➤

$$\Delta h = H_{MSPM-KA} - H_{MSPM-ET},$$

где $H_{MSPM-KA}$ — высота МСПМ в подспутниковой точке по измерениям ВРВ.

В качестве окончательного значения калибровочной поправки принимают среднее арифметическое значение по результатам вычисления калибровочной поправки в каждой подспутниковой точке по формуле

4 ➤

$$\bar{\Delta h} = \bar{\Delta h}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i.$$

Стандартную неопределенность вычисляют по формуле средней квадратической погрешности среднего арифметического значения

5 ➤

$$m_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\Delta h_i - \bar{\Delta h}_i \right)^2}.$$

3 Результаты

3.1 Построение геоинформационной модели

Экспериментальные исследования проведены путем геоинформационного моделирования калибровки ВРВ с использованием измерительной и вспомогательной информации калибровочного сеанса ВРВ отечественной КГС от 19 октября 2021 года (далее — калибровочного сеанса), описанного в [6]. В ходе калибровочного сеанса выполнен набор измерительной информации с использованием

Рис. 3

Схема калибровочного сеанса

Fig. 3

Calibration session diagram

Условные обозначения

- Положение ВБ
- Подспутниковая точка
- △ Базовый приемник



четырех ВБ, размещенных в морской акватории вдоль подспутниковой трассы КА геодезического назначения отечественной КГС (рис. 3).

Допуская, что направление подспутниковой трассы совпадает с направлением градиента динамической топографии в границах морской акватории, мы можем утверждать, что вертикальный профиль, полученный подспутниковой трассой, наилучшим образом описывает возмущение морской поверхности. Иными словами, полученный профиль является поперечным срезом «волны» морской поверхности, образованной средне- и долгопериодическими возмущающими факторами. Значительное возмущение фактической морской поверхности от геоида вблизи северо-восточного берега Черного моря полностью подтверждается профилем МСПМ, полученным по измерениям ВРВ, и другими научными исследованиями [10].

Моделирование выполнено в два этапа.

Первый этап включал:

- расчет высоты МСПМ в точках на подспутниковой трассе по измерениям реальных ВБ;
- определение коэффициентов полинома второй степени, описывающего профиль морской поверхности вдоль подспутниковой трассы.

Второй этап подразумевал:

- расчет высоты МСПМ в проекциях положения ВБ на подспутниковую трассу с использованием описывающего полинома второй степени;
- редукцию высоты МСПМ в точки моделируемой сети ВБ.

В ходе калибровочного сеанса отклонение положения ВБ от подспутниковой трассы составило от 1,5 до 4,5 км. Для построения математической модели профиля целесообразно воспользоваться правилами редукции высоты МСПМ в заданную точку с использованием цифровой модели геоида и модели средней динамической топографии [6].

Рис. 4

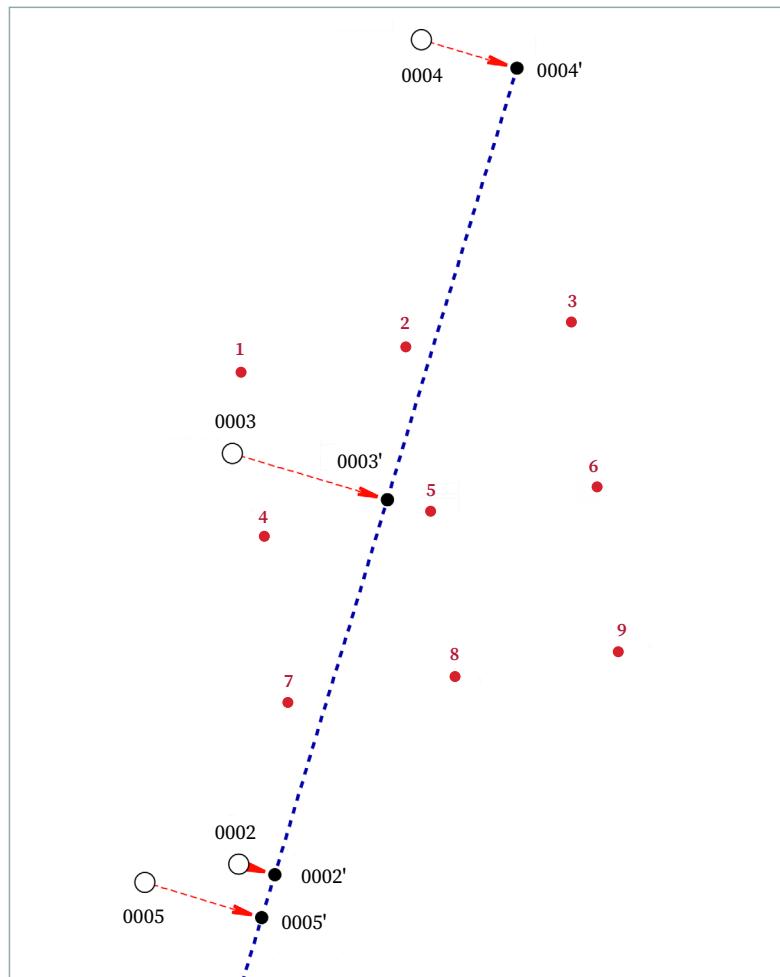
Схема первого этапа
моделирования

Fig. 4

Scheme of the first stage
of modeling

Условные обозначения

- Точка размещения ВБ
(калибровочный сеанс)
- Точка размещения ВБ
(модель)
- Точки редукции
на подспутниковую трассу
- Подспутниковая трасса



При проведении эксперимента использовались:

- цифровая модель геоида EGM2008 в формате *.MTW⁴;
- цифровая модель средней динамической топографической поверхности Черного моря СМЕМС_2020_BLK_MDT в формате *.MTW⁵.

Работы по расчету величин с использованием цифровых моделей выполнены в ГИС «Карта 2011». Обработка ИИ ВРВ и расчет высоты МСПМ в подспутниковых точках выполнены АО «НПК „СПП“».

Редукция высоты МСПМ выполняется в точки, образованные пересечением подспутниковой трассы и нормалью к ней, проходящей через точку расположения каждого ВБ (рис. 4). При этом понимается, что редукция осуществляется перпендикулярно градиенту динамической топографии, следовательно, погрешностью, обусловленной динамической топографией, можно пренебречь.

Для каждой точки на подспутниковой трассе, в которую выполнена редукция высоты, рассчитывается ее удаление от условного начала. В качестве условного начала принимается точка проекции положения ВБ 0004 на подспутниковую трассу (0004'). По высотам в четырех точках (0004', 0003', 0002', 0005') и расстоянию от условного начала вычисляются коэффициенты полинома второй степени, описывающего профиль МСПМ.

На втором этапе с использованием полученного полинома второй степени выполняется расчет высоты в точках на подспутниковой трассе (1'-9'),

⁴ Модель геоида EGM2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gisinfo.ru/download-map?id=127> (дата обращения: 22.05.2024).

⁵ Модель средней динамической топографической поверхности Черного моря СМЕМС_2020_BLK_MDT. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_BLK_PHY_MDT_L4_STATIC_008_067/DATA-ACCESS (дата обращения: 22.05.2024).

Рис. 5

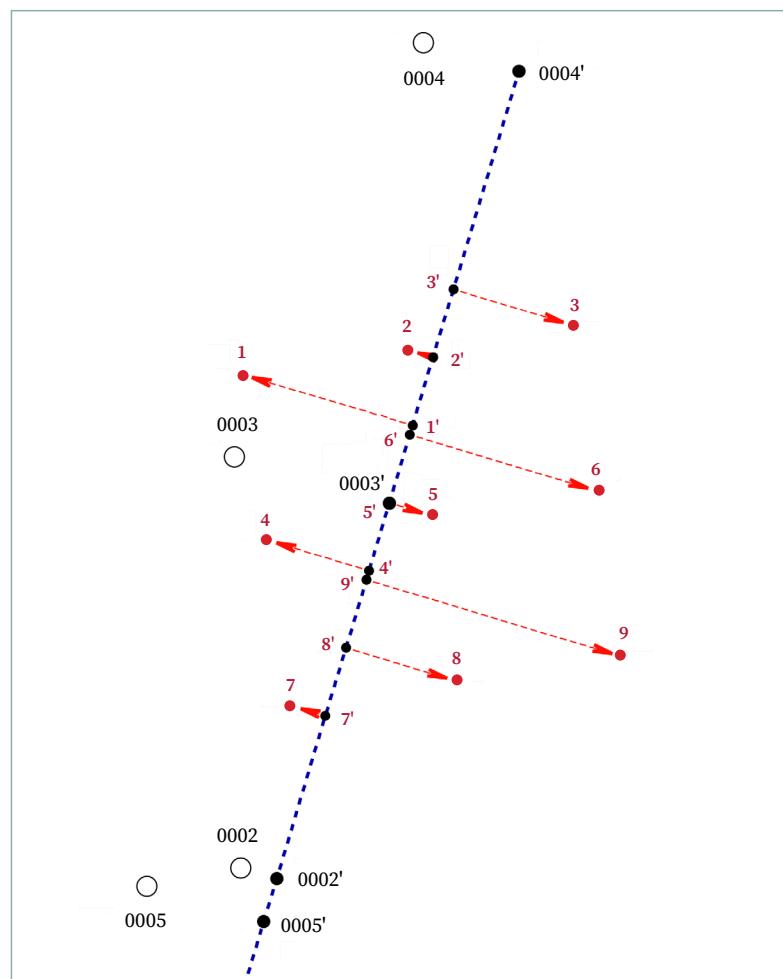
Схема второго этапа моделирования

Fig. 5

Scheme of the second stage of modeling

Условные обозначения

- Точка размещения ВБ (калибровочный сеанс)
- Точка размещения ВБ (модель)
- Точки редукции на подспутниковую трассу
- Подспутниковая трасса



образованных проекциями точек размещения ВБ моделируемой сети, и последующая ее редукция в точки размещения ВБ моделируемой сети (рис. 5).

Расчет калибровочной поправки выполнялся двумя способами. Первый способ подразумевает вычисление разности высоты МСПМ, полученной из измерений ВРВ, и эталонной высоты МСПМ, полученной из модели, в той же подспутниковой точке (формат сеанса калибровки — «Модель»). Второй способ реализуется с помощью методики калибровки ВРВ с использованием ГНСС, рассмотренной в [6] (формат сеанса — «Одиночный ВБ»). При этом в качестве измерений одиночного ВБ принимается значение высоты МСПМ, полученной на подспутниковой трассе в результате моделирования (точка 0003'). Выбранный подход позволит оценить абсолютное значение погрешностей калибровки, обусловленных влиянием аномалий динамической топографии.

3.2 Результаты эксперимента

Результаты эксперимента по определению калибровочной поправки ВРВ отечественной КГС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента по калибровке ВРВ отечественной КГС

Table 1

Results of experimental calibration of the GEO-IK-2 altimeter

Формат сеанса калибровки	Калибровочная поправка (Δh), м	Стандартная неопределенность, ($m_{\Delta h}$), м
Одиночный ВБ	0,084	0,014
Модель	0,060	0,012

Результаты эксперимента показывают, что применение геоинформационной модели МСПМ при расчете калибровочной поправки позволяет повысить точность ее определения в отношении как правильности, так и прецизионности результата. При этом следует отметить, что погрешность определения калибровочной поправки, влияющая на правильность результата, может составлять более 30 % от величины самой поправки в случае отказа от применения геоинформационной модели. Незначительное изменение прецизионности результатов, полученных при проведении калибровочных сеансов различного формата, может быть объяснено большим количеством измерений (более 30), использованных для расчета калибровочной поправки.

4 Обсуждение

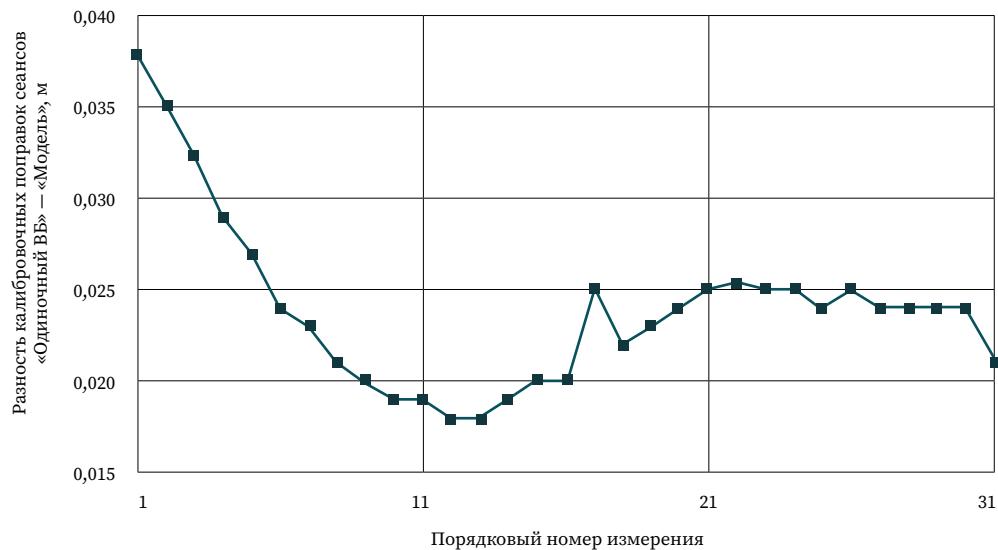
Особый интерес в рамках исследований представляет анализ разностей значений калибровочных поправок в подспутниковых точках, полученных при различных форматах сеанса измерений: «Модель» и «Одиночный ВБ». Результаты анализа представлены на рис. 6. Минимальная разность между значениями калибровочных поправок отмечена в подспутниковой точке, располагающейся вблизи точки 0003¹, в которой имитировались измерения одиночного ВБ: она составила 0,018 м. По мере удаления подспутниковых точек от одиночного ВБ разность значений калибровочной поправки ВРВ увеличивается. Это говорит о том, что кривизна реальной морской поверхности вдоль подспутниковой трассы вследствие влияния возмущающих факторов отличается от кривизны эквипотенциальной поверхности, заданной моделью геоида. При этом применительно к исследуемому сеансу калибровки разность кривизны поверхностей имеет ярко выраженный градиент по направлению к первому по порядку измерению ВРВ – в направлении берега. Предлагаемый метод калибровки ВРВ с использованием геоинформационного мониторинга и построенной с его помощью геоинформационной модели морской поверхности позволяет устранить погрешности калибровки, свойственные другим методам калибровки.

Рис. 6

Распределение разностей калибровочных поправок разных форматов сеанса калибровки

Fig. 6

Distribution of the difference in calibration corrections for different calibration session



5 Выводы

В результате экспериментальных исследований установлено, что применение геоинформационной модели МСПМ приводит к существенному повышению точности (правильности) калибровочной поправки ВРВ за счет устранения влияния динамической топографии морской поверхности.

Проведение регулярных абсолютных внешних калибровок ВРВ отечественной КТС на различных акваториях с использованием существующей [6] и разработанной методик калибровки ВРВ должно стать одним из инструментов, обеспечивающих возможность повышения эффективности задач геодезического обеспечения потребителей национальной системы пространственных данных. Перспективными направлениями исследований в области калибровки ВРВ являются вопросы размещения и технического оснащения перспективных полигонов калибровки ВРВ, разработка технологии относительной калибровки ВРВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность АО «НПК „СПП“», АО КБ «Панорама» за участие и содействие в проведении исследований и лично П.Э. Яковенко за поддержку при принятии сложных решений.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Mertikas S., Donlon C., et al. Fifteen Years of Cal/Val Service to Reference Altimetry Missions: Calibration of Satellite Altimetry at the Permanent Facilities in Gavdos and Crete, Greece // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 10. P. 1557. DOI:10.3390/rs10101557.
2. Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., et al. Corsica: A 20-yr multi-mission absolute altimeter calibration site // Advances in Space Research. 2021. Vol. 68. No. 1. P. 1171–1186. DOI:10.1016/j.asr.2019.09.049.
3. Liu Y., Tang J., Zhu J., et al. An improved method of absolute calibration to satellite altimeter: A case study in the Yellow Sea, China // Acta Oceanologica Sinica. 2014. Vol. 33. No. 5. P. 103–112. DOI:10.1007/s13131-014-0476-8.
4. Haines B., Desai S.D., Kubitschek D., et al. A brief history of the harvest experiment: 1989–2019 // Advances in Space Research. 2021. Vol. 68. No. 2. P. 1161–1170. DOI:10.1016/j.asr.2020.08.013.
5. Zhou B., Watson C., Legresy B., et al. GNSS/INS-equipped buoys for altimetry validation: Lessons learnt and new directions from the Bass Strait Validation Facility // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. No. 18. P. 3001. DOI:10.3390/rs12183001.
6. Яковлев Н.Н. Методика калибровки высокоточного радиовысотометра (альтиметра) с использованием глобальных навигационных спутниковых систем // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68. № 3. С. 8–25. DOI:10.30533/GiA-2024-023.
7. Цветков В.Я. Информационные модели и геоинформационные модели // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. Т. 4. № 16. С. 114–120. DOI:10.21777/2312-5500-2016-4-114-120.
8. Цветков В.Я. Геоинформационный мониторинг // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2005. № 5. С. 151–155.
9. Ратнер Е.А., Зайцев А.И., Квасной М.А. Сплайн-интерполяция для построения трехмерных батиметрических моделей при картографировании внутренних водных путей // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12. № 5. С. 894–905. DOI:10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.
10. Медведев И.П. Дисперсионный анализ колебаний уровня Черного моря в широком диапазоне частот // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 6. С. 489–500. DOI:10.22449/0233-7584-2018-6-489–500.

АВТОР**Яковлев Николай Николаевич**

ГАУ МО «НИИПИ градостроительства», Реутов, Россия

 0009-0006-5338-0379

Поступила 02.11.2024. Принята к публикации 21.02.2025. Опубликована 28.02.2025.



Calibration methodology of satellite altimeter using geoinformation monitoring

Nikolai N. Iakovlev¹✉

¹ Research and Project Institute of Urban Planning, Reutov, Russia
✉ yakovlevnn@niipi.ru

CITATION Iakovlev NN. Calibration methodology of satellite altimeter using geoinformation monitoring. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2025;69(1): 10–22. DOI:10.30533/GiA-2025-001.

KEYWORDS gravitational field, space geodetic system, satellite altimeter, external calibration, sea surface height, geoinformation monitoring

ABSTRACT Satellite altimetry is an effective way to study the Earth's gravity field, the behavior of the World Ocean and to observe climate change. This is facilitated by the global distribution of measurements and their high accuracy. To obtain high-precision altimetry measurements, it is necessary to take into account the errors of a significant number of parameters affected by the state of the atmosphere, the sea surface and internal instrument delays of the altimeter. The residual error after taking into account all error sources is determined using external calibration. Most often, buoys with receivers of global navigation satellite systems are used for external calibration. This article discusses ways to improve the existing altimeter calibration methodology. To improve the calibration, it is proposed to use one of the tools of geoinformatics – geoinformation monitoring. Using geoinformation monitoring to build an information model of the sea surface, it is possible to take into account the influence of the most complex factor – sea surface anomalies or dynamic topography. The article proposes options for changing the number of measuring systems and rules for their application. To implement geoinformation monitoring, a method for constructing a geoinformation model of the sea surface using second-degree polynomials is studied. The results of experimental studies on the calibration of a satellite altimeter using the geoinformation monitoring method are presented.

ACKNOWLEDGEMENTS The author expresses gratitude to JC PRC "PSI", JC KB "Panorama" for their participation and assistance in conducting research and personally P.E. Yakovenko for support in making difficult decisions.

REFERENCES

1. Mertikas S, Donlon C, et al. Fifteen Years of Cal/Val Service to Reference Altimetry Missions: Calibration of Satellite Altimetry at the Permanent Facilities in Gavdos and Crete, Greece. *Remote Sensing*. 2018;10(10): 1557. DOI:10.3390/rs10101557.
2. Bonnefond P, Exertier P, Laurain O, et al. Corsica: A 20-yr multi-mission absolute altimeter calibration site. *Advances in Space Research*. 2021;68(1): 1171–1186. DOI:10.1016/j.asr.2019.09.049.
3. Liu Y, Tang J, Zhu J, et al. An improved method of absolute calibration to satellite altimeter: A case study in the Yellow Sea, China. *Acta Oceanologica Sinica*. 2014;33(5): 103–112. DOI:10.1007/s13131-014-0476-8.
4. Haines B, Desai SD, Kubitschek D, et al. A brief history of the harvest experiment: 1989–2019. *Advances in Space Research*. 2021;68(2): 1161–1170. DOI:10.1016/j.asr.2020.08.013.
5. Zhou B, Watson C, Legresy B, et al. GNSS/INS-equipped buoys for altimetry validation: Lessons learnt and new directions from the Bass Strait Validation Facility. *Remote Sensing*. 2020;12(18): 3001. DOI:10.3390/rs12183001.
6. Iakovlev NN. Metodika kalibrovki vysokotochnogo radiovysotomera (al'timetra) s ispol'zovaniem global'nyh navigacionnyh sputnikovyh sistem [Methodology for calibrating a satellite altimeter using global navigation satellite systems]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(3): 8–25. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-023.
7. Tsvetkov VYa. Informacionnye modeli i geoinformacionnye modeli [Information models and geographic information models]. *Educational Resources and Technologies*. 2016;4(16): 114–120. (In Russian). DOI: 10.21777/2312-5500-2016-4-114-120.
8. Tsvetkov VYa. Geoinformacionnyj monitoring [Geoinformation monitoring]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2005;5: 151–155. (In Russian).
9. Ratner EA, Zajcev AI, Kvasnoj MA. Splajn-interpoljacija dlja postroenija trehmernyh batimetriceskikh modelej pri kartografirovaniu vnutrennih vodnyh putej [Analysis of the accuracy of interpolation methods in the process of bathymetric mapping of inland waterways]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2020;12(5): 894–905. (In Russian). DOI:10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.
10. Medvedev IP. Dispersionnyj analiz kolebanij urovnja Chernogo morja v shirokom diapazone chastot [Analysis of variance of the Black Sea level oscillations in a wide range of frequencies]. *Physical Oceanography*. 2018;34(6): 489–500. DOI:10.22449/0233-7584-2018-6-489-500.

AUTHOR**Nikolai N. Iakovlev**

Research and Project Institute of Urban Planning, Reutov, Russia

 0009-0006-5338-0379

Submitted: November 02, 2024. Accepted: February 21, 2025. Published: February 28, 2025.