



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.1>

УДК: 621.396.969

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ПРИЛИВОВ И ГЛУБИНЫ СНЕГА

В.Ф. Фатеев, В.П. Лопатин, Д.А. Артющев

**Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений
141570, Московская обл., р.п. Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ»**

Статья поступила в редакцию 23 октября 2025 г.

Аннотация. Бистатический метод, использующий отраженные от поверхности Земли сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), может быть использован для определения и мониторинга различных геофизических параметров отражающей поверхности. В данной статье рассматривается метод контроля отношения «сигнал/шум», являющийся одним из методов бистатической радиолокации по сигналам ГНСС (ГНСС-рефлектометрии), представляющий собой наблюдение за периодическими колебаниями отношения «сигнал/шум» принятой смеси прямого и отраженного сигналов, вызванных попеременным сложением этих сигналов в фазе и в противофазе. В работе приведены необходимые теоретические зависимости, описывающие этот метод. Обработаны первичные данные с зарубежных ГНСС-станций рассматриваемым методом, получены высоты приливов и глубины снежного покрова, а также приводится сравнение этих данных с данными, полученными традиционными методами. Сравнение данных демонстрирует коэффициент корреляции выше 0,8 и погрешность на уровне единиц сантиметров, что подтверждает пригодность бистатического метода, использующего сигналы ГНСС, для решения задач определения высоты приливов и глубины снежного покрова.

Ключевые слова: бистатическая радиолокация, глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС-рефлектометрия, мареограф, приливы, высота снежного покрова.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

Автор для переписки: Лопатин Владислав Павлович, lopatin@vniiftri.ru

Введение

За время существования спутниковой навигации сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) нашли применение не только для решения задач координатно-временных определений [1]. Одним из методов, основанным на использовании сигналов ГНСС, является метод бистатической радиолокации для определения характеристик отражающей поверхности, суть которого заключается в использовании информации, содержащейся в отраженных ГНСС-сигналах [2]. За рубежом бистатическая радиолокация, использующая сигналы ГНСС, получила название GNSS-Reflectometry (рус. ГНСС-рефлектометрия) [1].

Методы бистатической радиолокации по сигналам ГНСС могут применяться для решения таких задач, как [1-6]:

- определение изменения уровня поверхности океана, рек и озер;
- определение сезонного изменения глубины снежного покрова;
- определение характеристик взволнованности водной поверхности и скорости приповерхностного ветра;
- определение ледовой обстановки;
- определение границ водных объектов;
- мониторинг влажности почвы и др.

В настоящее время уровень мирового океана повышается со скоростью 3 мм/год в результате продолжающегося изменения климата. Распределение локального повышения уровня моря неравномерно, поэтому в некоторых

районах наблюдается значительно более высокий, чем в среднем, уровень моря, в то время как в других районах наблюдается его понижение.

Локальное относительное изменение уровня моря традиционно измеряется с помощью метеографов, в то время как глобальные оценки уровня моря основаны на измерениях спутниковых высотомеров. В России имеются метеографы для оценки уровня моря, однако существуют проблемы с их количеством, состоянием и привязкой к глобальным системам координат [7]. Поэтому данные таких метеографов не могут быть использованы при исследовании глобального изменения уровня моря и оценки высот приливов.

Методы бистатической радиолокации по сигналам ГНСС для решения задачи измерения уровня отражающей водной поверхности могут быть разделены на две группы:

- методы, использующие две антенны (в «надир» с правой круговой поляризацией и в «зенит» с левой круговой поляризацией), и в которых обрабатываются сигналы ГНСС прямого распространения от навигационных космических аппаратов (НКА) и отраженные от различных поверхностей;

- методы, использующие одну антенну и в которых обрабатывается и анализируется суммарный сигнал, представляющий собой сумму прямого и отраженного сигналов ГНСС от каждого НКА.

Поэтому использование измерений ГНСС-станций с одной антенной вблизи моря могут быть использованы для измерения его уровня. Такие измерения имеют преимущество, заключающееся в том, что движение коренной породы одновременно измеряется с высокой точностью по прямым сигналам ГНСС, что позволяет напрямую рассчитывать локальный уровень моря.

1 Описание метода «отношения сигнал/шум»

Суммарный сигнал, поступающий на вход приемного устройства, представляет собой сумму прямого и отраженного от поверхности ГНСС-сигналов. Суммарный сигнал может быть представлен в следующем виде:

$$x(t) = s_D + s_R + n(t) = \left[A_D c(t - \tau_D) \cos(2\pi(f_{RF} + f_d)) + \varphi_0 \right] + \\ + \left[A_R c(t - \tau_R) \cos(2\pi(f_{RF} + f_d)) + \varphi_0 + \varphi_R(t) \right] + n(t),$$

где s_D , s_R – прямой и отраженный ГНСС-сигналы; f_{RF} – частота несущей; f_d – допплеровский сдвиг частоты; φ_0 – начальная фаза; φ_R – фазовая задержка между прямым и отраженным сигналами; τ_R , τ_D – времененная задержка сигналов; c – дальномерный код огибающей; A_D , A_R – амплитуда прямого и отраженного сигналов; $n(t)$ – белый гауссовский шум.

При большом интервале времени приема суммарного сигнала его амплитуда будет изменяться со временем в зависимости от разности фаз прямого и отраженного сигналов φ_R (сигналы будут складываться либо синфазно, либо в противофазе).

Разность фаз $\varphi_R(t)$ отраженного сигнала относительно прямого возникает вследствие разности хода лучей $\delta\rho$, которая за счет плоского фронта волны равна длине хода отраженного луча. Геометрия приема прямых и отраженных ГНСС-сигналов с помощью одной антенны показана на рисунке 1.

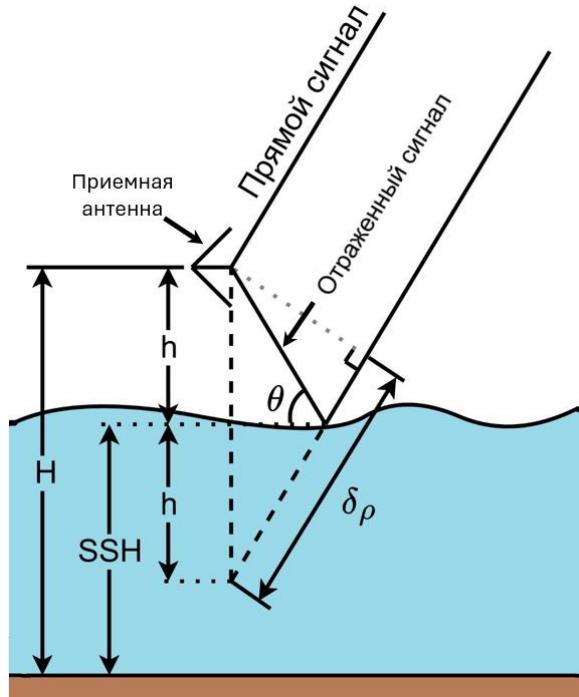


Рис. 1. Демонстрация принципа метода ГНСС-Р.

Набег фазы, возникший из-за разности хода лучей, определяется следующим образом:

$$\varphi_R(t) = \frac{2\pi\delta\rho}{\lambda},$$

где $\delta\rho = h \sin(\theta(t))$; $\theta(t)$ – угол падения/отражения сигнала, равный возвышению НКА над горизонтом в момент времени t ; λ – длина волны сигнала, h – высота расположения антенны над отражающей поверхностью.

Используя тригонометрические соотношения, суммарный сигнал на входе приемника $x(t)$ может быть представлен в виде:

$$x(t) = A(t) c(t - \tau) \cos(2\pi(f_{RF} + f_d)t + \varphi(t)),$$

$$\text{где } A(t) = \sqrt{A_D^2 + A_R^2 + 2A_D A_R \cos(\varphi_R(t))}; \varphi(t) = \varphi_D + \arctg \left(\frac{A_R \sin(\varphi_R(t))}{A_D + A_R \cos(\varphi_R(t))} \right).$$

Таким образом, периодическое изменение амплитуды суммарного принимаемого сигнала ГНСС зависит от разности фаз $\varphi_R(t)$, которая однозначно связана с углом возвышения НКА $\theta(t)$ и искомой высотой до отражающей

поверхности h . В приемном устройстве оценивается отношение «сигнал/шум» после переноса суммарного сигнала на промежуточную частоту и после корреляционной обработки [8]. В этом случае отношение «сигнал/шум» пропорционально $A^2(t)$. Частота изменения отношения «сигнал/шум» соответствует отношению $2h/\lambda$. Это означает, что путем оценки частоты изменения наблюдаемого отношения «сигнал/шум» суммарного сигнала, можно найти высоту антенны h над отражающей поверхностью.

Недостатком данного метода является увеличение времени наблюдения при уменьшении высоты расположения антенны h относительно отражающей поверхности. Эта зависимость может быть выражена следующим образом:

$$\frac{4h}{\lambda} \sin(\theta(t_0) + \Delta\theta) - \frac{4h}{\lambda} \sin(\theta(t_0)) = 2\pi,$$

$$h = \frac{\pi\lambda}{4\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)\cos\left(\theta(t_0) + \frac{\Delta\theta}{2}\right)},$$

где $\Delta\theta$ – требуемое значение приращения угла возвышения НКА; $\theta(t_0)$ – начальное значение угла возвышения НКА.

На рисунке 2 представлены зависимости, демонстрирующие приращение угла возвышения НКА $\Delta\theta$ необходимое для оценки различной высоты антенны до отражающей поверхности h при некоторых начальных углах возвышения θ . Так, для оценки высоты антенны до отражающей поверхности в 9 метров при начальном угле возвышения НКА 5° необходимое приращение угла возвышения $\Delta\theta$ составит около $0,6^\circ$. Поэтому при типовой скорости возвышения НКА на низких углах возвышения около $0,03$ град/с оценка высоты в 9 м возможна за 20 с измерений отношения «сигнал/шум» суммарного сигнала одного НКА.

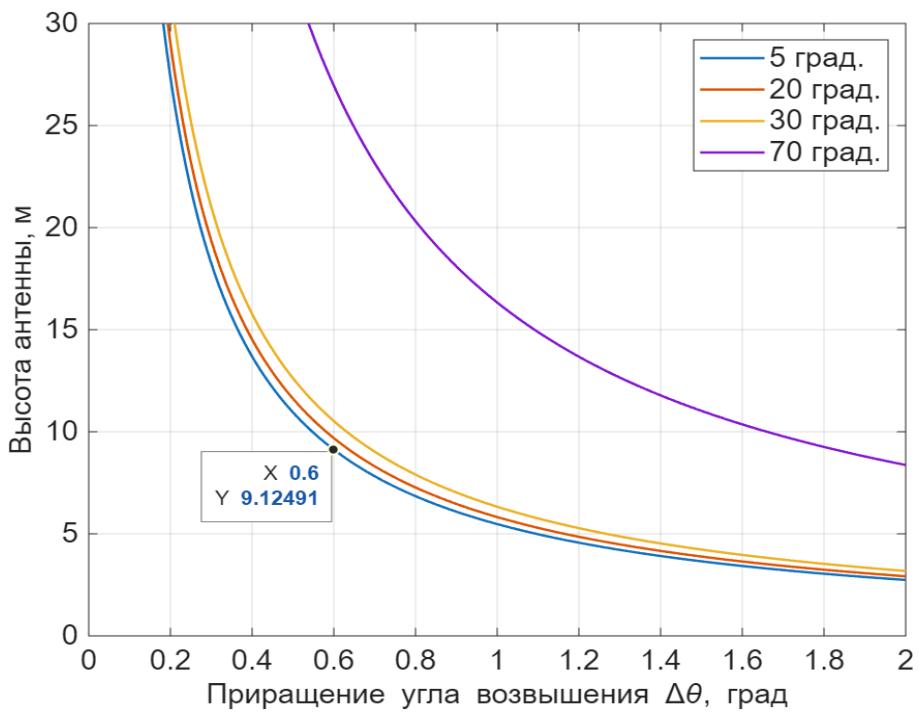


Рис. 2. Зависимость требуемого приращения угла возвышения $\Delta\theta$ для измерения высоты h антенны до отражающей поверхности.

Прямой ГНСС-сигнал имеет правую круговую поляризацию, а отраженный сигнал либо меняет свою поляризацию на левую круговую, либо сохраняет правую круговую. Доля каждой поляризации в отраженном сигнале оценивается с помощью двух коэффициентов отражения Френеля, являющихся функциями угла падения/отражения θ ГНСС-сигнала, диэлектрической проницаемости среды распространения и диэлектрической проницаемостью отражающей поверхности [10]. В зависимости от угла падения и диэлектрической проницаемости отражающей поверхности были вычислены значения коэффициентов отражения Френеля, которые представлены на рисунке 3. Расчет был проведен для соленой воды температурой 20°C, а также для льда с температурой 0°C.

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что прием на одну антенну прямого и отраженного сигналов с правой круговой поляризацией возможен для углов возвышения НКА не более 30°.

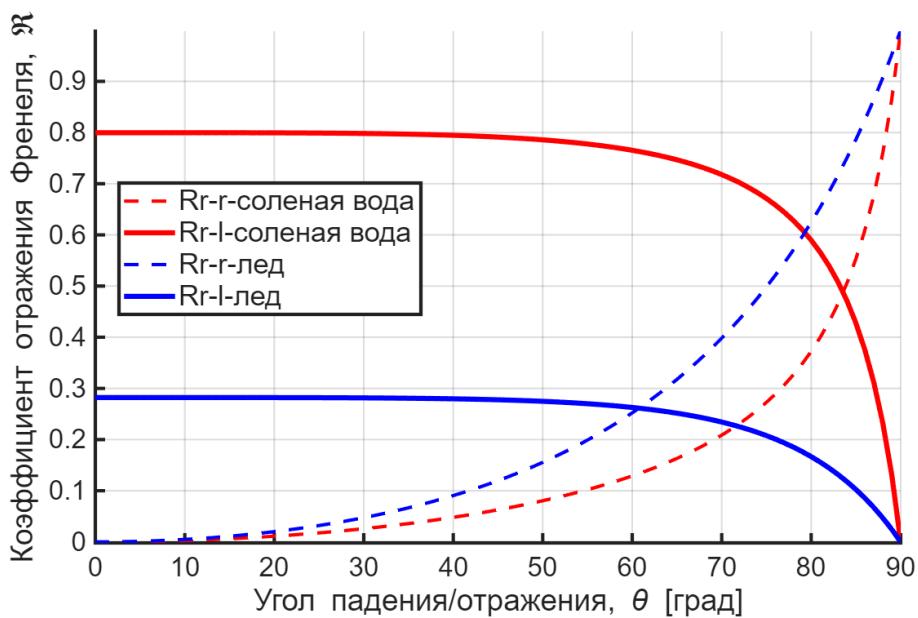


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения Френеля в зависимости от угла падения θ .

2 Экспериментальная часть

В рамках экспериментальной части была поставлена следующая задача: необходимо определить высоту приемной антенны относительно отражающей поверхности, оценить погрешность измерений, а также определить коэффициент корреляции между значениями высот, полученных с помощью традиционных методов и с помощью метода бистатической радиолокации на сигналах ГНСС, использующего оценки отношения «сигнал/шум».

За интервал наблюдения был принят один календарный год, выбор которого произволен.

2.1 Наблюдение за приливами.

В качестве источников экспериментальных данных были выбраны четыре станции с антенной и приемником ГНСС-сигналов. Со всех станций были получены «сырые» измерительные данные в формате Rinex. Обработка состояла в получении отношения «сигнал/шум» для каждой несущей частоты каждого видимого НКА с нужным углом места и азимутом. Так как измерения отношения «сигнал/шум» могут иметь пропуски, то вычисляются периодограммы Ломба, по которым оценивается высота, соответствующая гармоники с максимальной

амплитудой. Пример измерений отношения «сигнал/шум» принимаемого сигнала НКА на интервале времени 22 минуты показан на рисунке 4.

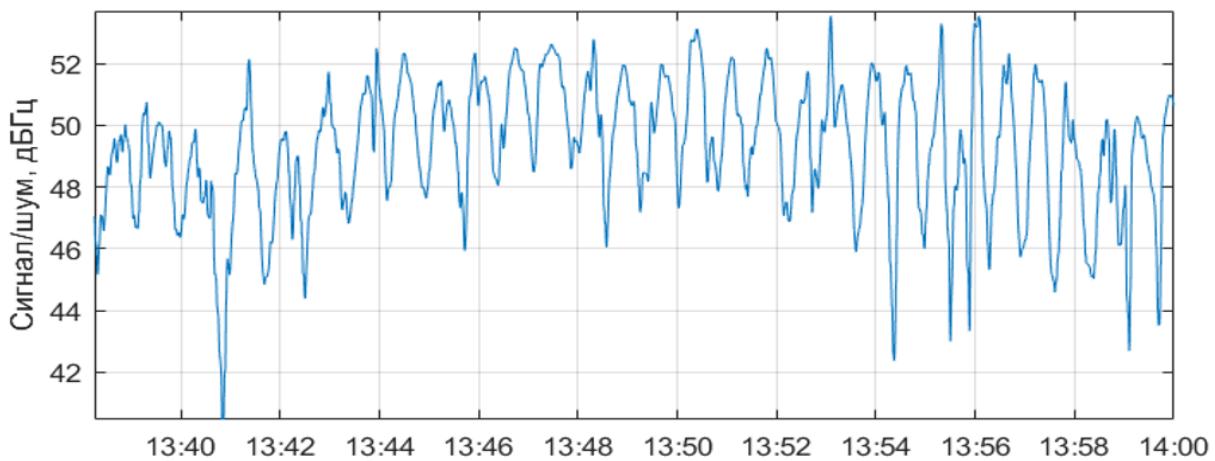


Рис. 4. Пример измерений отношения «сигнал/шум» по одному НКА на интервале времени 22 минуты.

Первая ГНСС-станция находится на причале города Сан-Себастьян-де-ла-Гомера (San Sebastián de la Gomera). В непосредственной близости от нее находится метеограф компании MIROS, работающий на несущих частотах 9,4-9,8 ГГц и с инструментальной погрешностью оценки высоты отражающей поверхности 0,5 см.

На рисунке 5 *a,б* приведены временные зависимости уровня моря, полученные по измерениям метеографа и с помощью обработки первичных измерений ГНСС-станции на интервале 1 год.

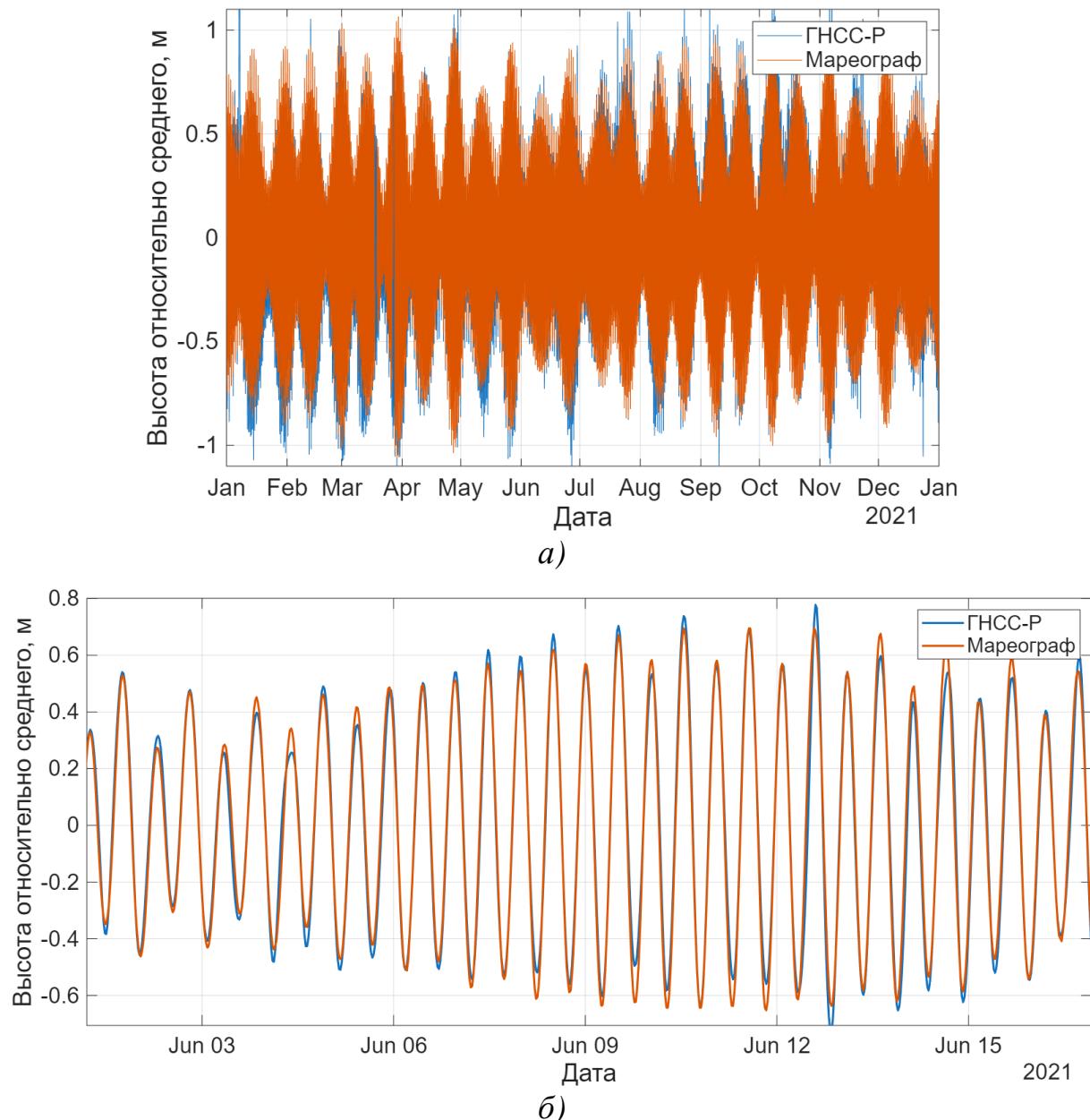


Рис. 5. Временные зависимости высоты отражающей поверхности, где Ла Гомера. *а*) – данные за год, *б*) – укрупненный фрагмент.

На рисунке 6 представлено сопоставление данных в виде разности между двумя наборами данных.

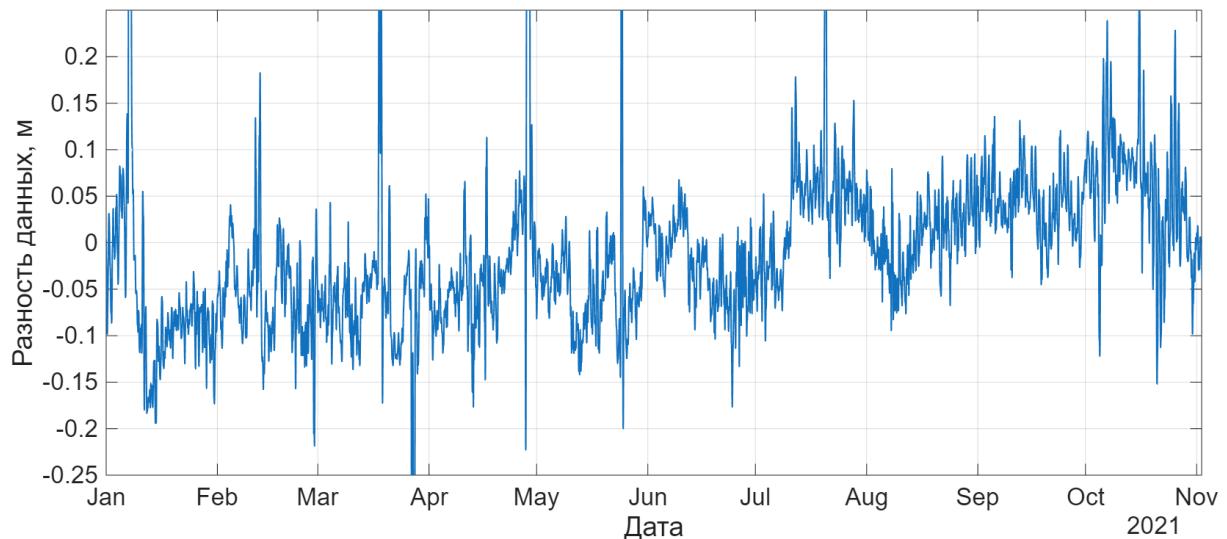


Рис. 6. Разность измерений метеографа и оценок высоты по измерениям ГНСС-станции.

Коэффициент корреляции составляет 0,92, СКО разности составило 12,1 см, среднее значение – 0,9 см.

Второй набор данных был получен от источников, находящихся в бухте Долларт (Dollart) Северного моря, находящейся на границе Нидерландов и Германии.

На рисунке 7 представлено сопоставление данных метеографа и оценок высоты по измерениям отношения «сигнал/шум» ГНСС-станции в виде диаграммы распределения.

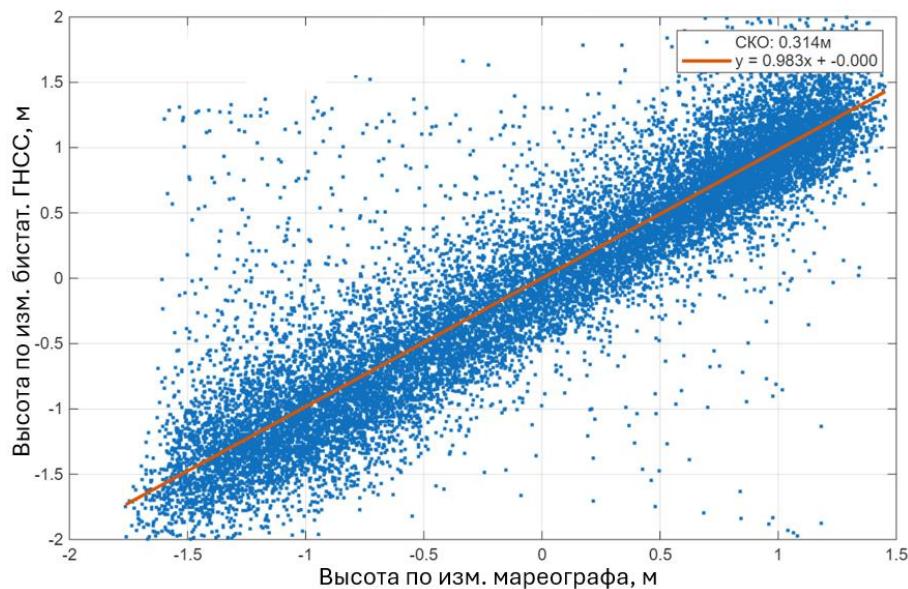


Рис. 7. Диаграмма распределения значений.

Коэффициент корреляции равен 0,91. СКО разности составило 31,4 см, среднее значение – 0 см. Повышенное значение СКО для набора данных в бухте Долларт может быть обусловлено интенсивным судоходством в этой области.

Третья станция находится в городе Фрайдей Харбор штата Вашингтон (Friday Harbor, D.C.) и является одной из наиболее удачных станций для анализа данных по приливам. На рисунке 8 показано взаимное расположение метеорографа и ГНСС-станции.



Рис. 8. Расположение метеорографа и приемной антенны ГНСС.

На рисунках 9, 10 представлены графики, демонстрирующие величину разности между двумя наборами данных, и диаграмма распределения значений соответственно. Коэффициент корреляции стремится к единице.

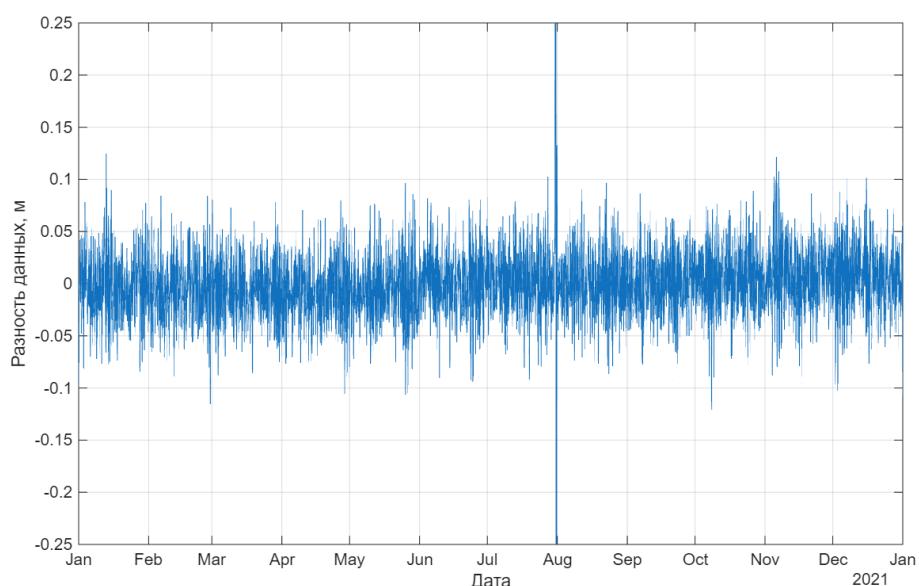


Рис. 9. Разность между данными метеорографа и ГНСС-станции, Фрайдей Харбор.

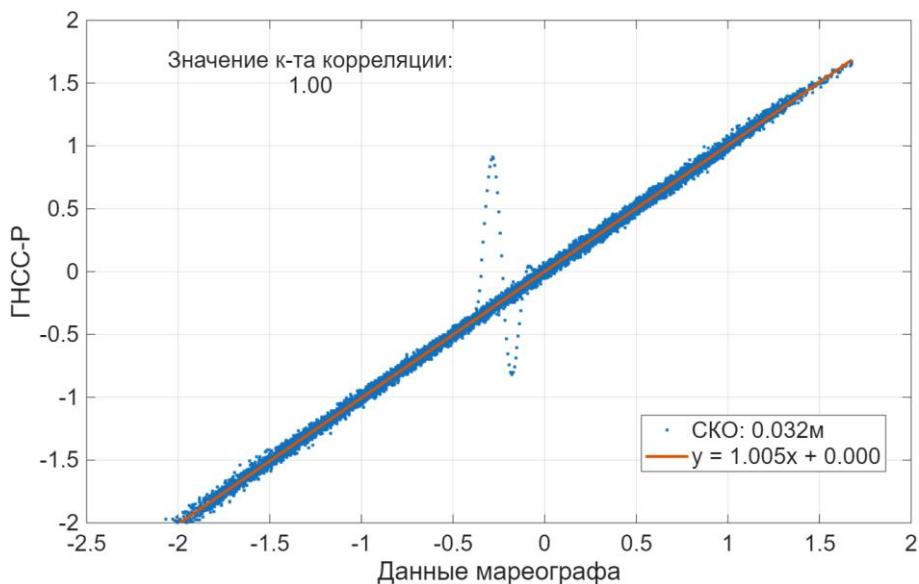


Рис. 10. Диаграмма распределения значений.

2.2 Оценка глубины снежного покрова

В качестве источников экспериментальных данных были выбраны ГНСС-станции, находящиеся в США. Выбор во многом обусловлен доступностью данных как от ГНСС-станций, расположенных на открытой местности, так и от местных метеорологических станций. Данные с ГНСС-станций были обработаны за год, который выбирался произвольно.

Первая ГНСС-станция расположена вблизи города Солдотна (Soldotna), а метеорологическая станция – примерно в 50 км севернее, в лосином заповеднике (Kenai Moose Pens).

На рисунке 11 приведены графики зависимости высоты приемной антенны до отражающей поверхности, полученной с помощью метода на основе анализа отношения «сигнал/шум» ГНСС-сигнала, и глубины снежного покрова, полученной с ближайшей метеостанции.

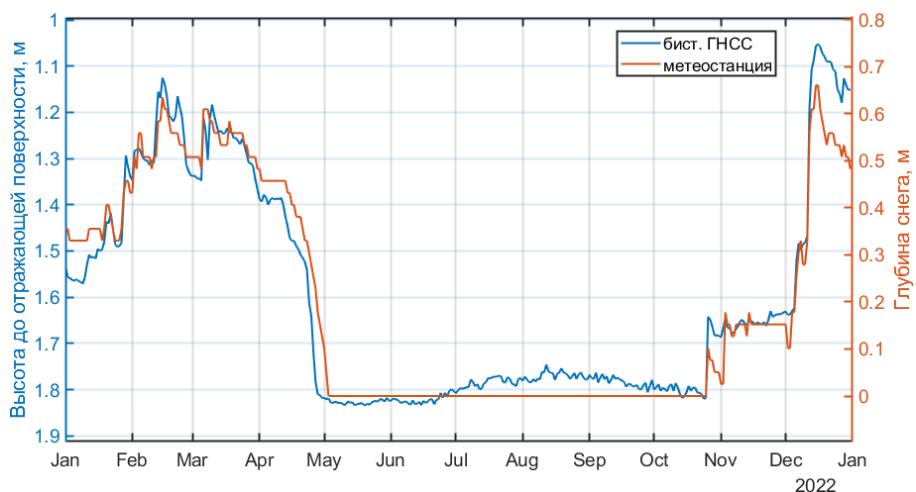


Рис. 11. Сопоставление данных о глубине снега и высоте антенны ГНСС над отражающей поверхностью, г. Солдотна.

Наблюдается соответствие между показаниями с метеостанции и результатами обработки первичных измерений с ГНСС-станции с коэффициентом корреляции 0,97.

Следующая ГНСС-станция расположена вблизи Айленд Парка штата Айдахо (Island Park, ID), а метеостанция ISPI1 – на 12 км северо-восточнее. На рисунке 12 представлены данные от этих станций. Коэффициент корреляции составил 0,97.

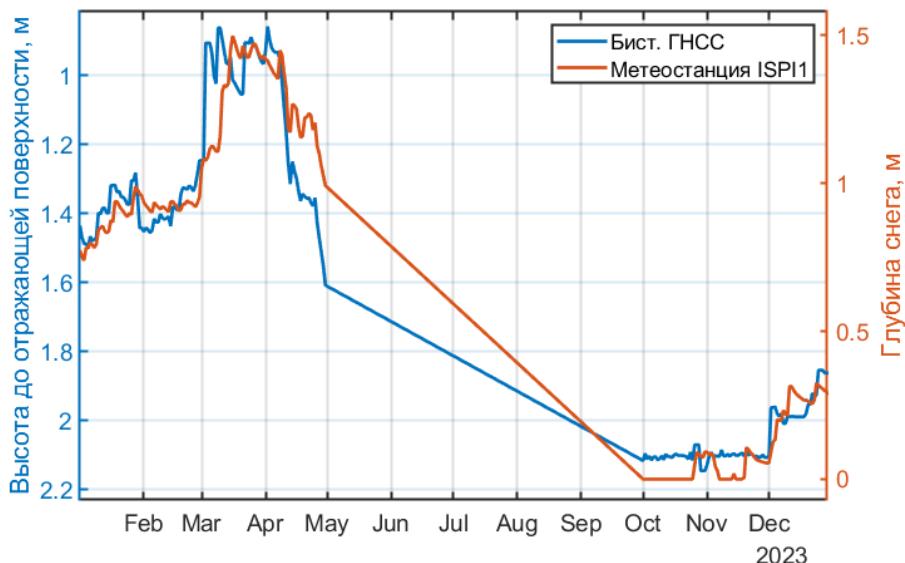


Рис. 12. Сопоставление данных о глубине снега и высоте антенны, Айленд Парк.

Заключение

В рамках данной работы была продемонстрирована возможность использования метода на основе анализа отношения «сигнал/шум» принимаемых суммарных ГНСС-сигналов (прямой + отраженный) в качестве альтернатив классическим метеографам и измерителям глубины снежного покрова и возможные проблемы, возникающие при этом, а именно:

- прием отраженных сигналов на антенну с правой круговой поляризацией возможен только для углов возвышения НКА 0-30°;
- место расположения приемной антенны ведет к необходимости наложения ограничений на азимуты принимаемых НКА, чтобы отражения были только от интересующей отражающей поверхности;
- активное судоходство ближе 100 м от приемной антенны влияет на результаты оценок высоты отражающей водной поверхности;
- уровень отражающей поверхности на суше может быть обусловлен не только уровнем земли или снежного покрова, но и уровнем растительности. ГНСС-станции при этом будут давать результаты, отличающиеся от тех, которые были бы получены традиционными методами.

Было выявлено, что погрешность оценки высоты отражающей поверхности с использованием метода на основе анализа отношения «сигнал/шум» суммарного ГНСС-сигнала может составлять единицы сантиметров с точной привязкой к высоте относительно эллипсоида, что очень важно при калибровке спутниковых высотомеров и долговременных измерений высоты приливов.

Оценка высоты до отражающей поверхности имеет корреляцию более 0,8 с данными метеостанций о глубине снега, что делает возможным использование отраженных сигналов ГНСС для измерения уровня снежного покрова. Оценка погрешности высоты снежного покрова требует дальнейшего исследования.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

Литература

1. Jin S., Camps A., Jia Y. et al. Remote sensing and its applications using GNSS reflected signals: advances and prospects. *Satell Navig* – 2024. – №. 5 (19). <https://doi.org/10.1186/s43020-024-00139-4>
2. Лопатин В. П., Мурзабеков М. М., Бобров Д. С. Метод определения высот геоида с помощью бортовой бистатической системы наноспутника на основе сигналов ГНСС //Альманах современной метрологии. – 2023. – №. 4(36). – С. 44-57.
3. Yan Q. and Huang W., Sea ice remote sensing using GNSS-R: A review //*Remote Sensing*. – 2019. – Т. 11 – №. 21. – С. 2565.
4. Munoz-Martin J. F. et al. Soil moisture estimation synergy using GNSS-R and L-Band microwave radiometry data from FSSCat/FMPL-2 //*Remote Sensing*. – 2021. – Т. 13. – №. 5. – С. 994.
5. Миронов В. Л., Михайлов М. И. и др. Измерение влажности и высоты посевов сельскохозяйственных полей с использованием приемника сигналов ГЛОНАСС и GPS // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2014. – №4 (56). – С. 88-97.
6. Artiushchev D. A. and Lopatin V. P., "Estimation of Water Objects Boundaries Using Bistatic GNSS Receiver," 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russian Federation. – 2024. – С. 10-13.
7. Обзор состояния и работы гидрологической сети в арктической зоне Российской Федерации за 2024 год <https://aari.ru/assets/files/93/8xpfhw-93-obzor-gidrologicheskoy-seti-azrf-2024.pdf>
8. Перов А.И., Харисов В.Н. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования// Радиотехника, 2010.
9. Semmling A.M. et al., Sea-ice concentration derived from GNSS reflection measurements in Fram Strait, *IEEE Trans. Geosci. RemoteSens.* – 2019 – Т. 57. – №. 12 – С. 10350–10361.

10. Cardellach E., Fabra F., Rius A., Pettinato S. D'Addio S. Char-acterization of dry-snow sub-structure using GNSS reflected signals, *Remote Sens. Environ.* – 2012 – Т. 124. – С. 122–134.

Для цитирования:

Фатеев В.Ф., Лопатин В.П., Артющев Д.А. Применение сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для определения высоты приливов и глубины снега. // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.1>