

УДК 528.223

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ГЕОИДА
И СКОРОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРА
ПО ОТРАЖЁННЫМ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА
СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

В.П. Лопатин, В.Ф. Фатеев

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
lopatin@vniiftri.ru*

Аннотация. Представлены методы определения высоты геоида с использованием пассивной бистатической радиолокационной системы на основе прямых и отражённых сигналов ГНСС. Такая система является перспективной для определения высоты геоида, скорости приповерхностного ветра, взволнованности водной поверхности и др. Представлен расчёт суммарной погрешности измерения высоты геоида с помощью интерференционного метода ГНСС-высотометрии. Моделирование показало, что по некоторым навигационным системам возможно получение погрешности определения высоты геоида не более 30 см, а при использовании фазового метода — на уровне сантиметра.

Ключевые слова: геоид, спутниковая альтиметрия, GNSS-R, бистатическая радиолокация.

**METHODS FOR DETERMINING GEOID HEIGHT
AND SURFACE WIND SPEED BY GLOBAL NAVIGATION
SATELLITE SIGNALS REFLECTED
FROM THE OCEAN SURFACE**

V.P. Lopatin, V.F. Fateev

*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
lopatin@vniiftri.ru*

Annotation. Methods for determining the height of the geoid using a passive bistatic radar system based on direct and reflected GNSS signals are presented. Such a system is promising for determining height of the geoid, speed of the surface wind, agitation of the water surface, etc. The calculation of the total uncertainty in measuring the height of the geoid using the interference method of GNSS-altimetry is presented. Simulation showed that for some navigation systems, it is possible to obtain an uncertainty in determining the height of the geoid of no more than 30 cm, and when using the phase method - at the level of a centimeter.

Key words: geoid, satellite altimetry, GNSS-R, bistatic radar.

Введение

В настоящее время спутниковая радионавигация рассматривается как одна из важнейших технологий координатно-временного и навигационного обеспечения. С развитием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) рассматриваются новые возможности и способы их широкого применения для дистанционного зондирования Земли.

ГНСС-рефлектометрия (GNSS-reflectometry) — метод пассивной бистатической радиолокации, основанный на принципе обнаружения сигналов ГНСС, отражённых от поверхности Земли, и их обработки для определения свойств подстилающей поверхности [1–3]:

Определение геоида представляет собой одну из основных задач геодезии, гравиметрии и океанографии. Геоид — это поверхность равного гравитационного потенциала на фигуре Земли, содержащая пункт, принятый за начало счёта высот. Поверхность геоида совпадает с поверхностью Мирового океана при отсутствии возмущающих сил.

В настоящее время измерения высоты водной поверхности океана проводятся с помощью методов активной спутниковой альтиметрии. Эти методы основаны на использовании радиовысотомеров, размещённых на борту специальных космических аппаратов (КА) геодезического назначения (ERS-1, 2; Jason-1, 2, 3; Saral; HY-2). Спутниковая альтиметрия на основе монолокаторов обладает высокой точностью (до 2 см) и позволяет избежать проведения дорогостоящих гравиметрических съёмок на всех участках Мирового океана. Вместе с тем, недостатки спутниковой активной альтиметрии:

- бортовой радиовысотомер требует электропитающего устройства большой мощности, большого веса и больших размеров;
- за один проход КА-носителя реализуется только один трек наблюдения текущего профиля высоты.

Для расширения зоны покрытия перспективным является использование бистатических методов спутниковой альтиметрии, основанных на отражённых от океана сигналах ГНСС. При таком методе измерения высоты полностью исключается бортовое передающее устройство со всеми его недостатками. Кроме того, за один проход КА-носителя возможно одновременное получение до 20–30 треков профиля высоты геоида (по числу видимых навигационных спутников радиоподсвета из числа ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou). Такая избыточность обеспечивает получение большего количества измерительной информации за один пролёт носителя приёмной аппаратуры [4, 5].

Впервые идея использования системы на основе методов бистатической радиолокации с использованием сигналов ГНСС была предложена в РФ группой исследователей во главе с В.Ф. Фатеевым в 1996 году [6].

Принцип работы бистатической системы на основе сигналов ГНСС основывается, во-первых, на приёме прямых сигналов от спутников ГНСС слабо-направленной антенной, направленной в «зенит» (рис. 1), а во-вторых, отражённых сигналов от водной поверхности в окрестности точки зеркального отражения. Чтобы решить задачу определения высоты до отражающей поверхности, необходимо определить разность времени распространения прямого и отражённого сигналов, координаты и скорости приёмника и спутника ГНСС. Кроме того, необходимо знать мощность принимаемого сигнала, модель отражающей поверхности, тропосферную и ионосферную задержки.

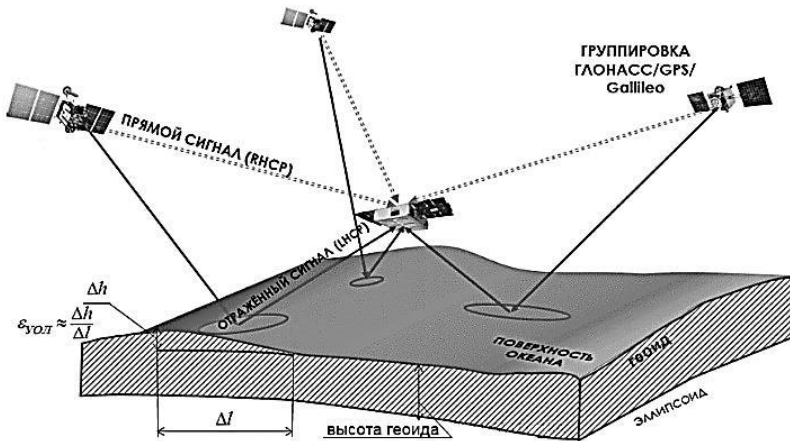


Рис. 1. Принцип работы бистатического радиовысотомера на основе сигналов ГНСС

Измерениями в бистатической системе ГНСС-высотометрии считается частотно-временная диаграмма, которая представляет собой двумерную свёртку принятого сигнала с локальной копией или другим принятым сигналом [7]:

$$|Y(\Delta\tau, \Delta f)|^2 = \chi^2(\Delta\tau, \Delta f) * \Sigma(\Delta\tau, \Delta f), \quad (1)$$

где * — двумерная свёртка двух функций, $\chi(\Delta\tau, \Delta f) = \Lambda(\Delta\tau)S(\Delta f)$ — функция неопределённости; $\Lambda(\Delta\tau)$ — автокорреляционная функция принятого ГНСС-сигнала, $S(\Delta f) = \text{sinc}(\pi T \Delta f)$; $\Delta\tau$ — задержка между зеркальной и наблюдаемой точками поверхности; Δf — доплеровское смещение частоты между зеркальной и наблюдаемой точками; $\Sigma(\Delta\tau, \Delta f)$ — сечение обратного рассеяния отражающей поверхности.

Определение высоты геоида

В настоящий момент выделяют несколько методов ГНСС-высотометрии, основанных на кодовых измерениях, фазовых измерениях, а также на измерениях суммарной мощности сигнала.

Кодовый метод

Кодовый метод (сGNSS-R) можно назвать традиционным. Так же, как и коммерческие приёмники, приёмники бистатической альтиметрической системы определяют псевдодальности и псевдодоплеровские смещения частоты для прямого и отражённого сигналов. Принимаемый прямой и отражённый сигналы подвергаются корреляционной обработке с локальной копией сигнала, генерируемой в приёмнике. В таком методе игнорируются зашифрованные компоненты сигналов, и таким образом снижается достижимая точность метода бистатической ГНСС-альтиметрии.

Интерференционный метод

Чтобы преодолеть ограничение использования всех компонент, используется интерференционный метод (iGNSS-R). Он основан на взаимной корреляционной обработке прямого и отражённого сигналов от одного НКА, принимаемого двумя антеннами. Так как прямой и отражённый сигналы имеют невысокое отношение сигнал/ шум (ОСШ), то для их селекции и увеличения ОСШ необходимо использовать антенны с большим коэффициентом усиления. Традиционная модель Брауна, которая используется в активных радиовысотомерах, не может быть применена при моделировании бистатистического ГНСС-высотомера из-за геометрии задачи [8]. Поэтому для интерференционного метода оценим суммарную погрешность определения высоты, исходя из модели (соотношение 1). Расчёт границ суммарной неисключённой систематической погрешности может быть произведён следующим образом:

$$\sigma_{h\Sigma} = 1,12 \sqrt{\sigma_{h_{ij}}^2 + \sigma_{EM}^2 + \sigma_{tro}^2 + \sigma_{orb}^2}, \quad (2)$$

где σ_{EM} — погрешность учёта электромагнитного смещения; σ_{tro} — погрешность учёта тропосферной задержки; σ_{orb} — погрешность определения геодезической высоты; $\sigma_{h_{ij}}$ — погрешность определения высоты при устранении ионосферной задержки, которая в свой состав включает инструментальную погрешность определения высоты на двух частотах.

Предполагается, что зеркальной точке отражения не соответствует максимум частотно-временной диаграммы, а соответствует максимуму его производной по времени [9].

Спекл-шум образуется в результате когерентной суперпозиции пространственно случайных колебаний отражённого сигнала от разных источников рассеяния. Рассеянные сигналы накладываются друг на друга, вызывая тем самым появление спекл-шума. Для космического бистатистического радиовысотомера предполагаем, что спекл-шум отсутствует. Тогда остаётся только аддитивный белый гауссовский шум, и достижимая погрешность временной задержки из теории оптимального оценивания рассчитывается на основе неравенства Крамера—Рао:

$$\sigma_{\tau_p}(B) \geq \frac{1}{\sqrt{q_{c/n_0}(B)}} \frac{1}{2\pi\beta(B)}, \quad (3)$$

где $q_{c/n_0}(B)$ — ОСШ; β — эффективная ширина спектра радиосигнала; B — полоса пропускания приёмника.

При этом [10]:

$$\beta^2 = \frac{\int f^2 |S(f)|^2 df}{\int |S(f)|^2 df}; \quad S(f) = \int s(t) e^{-i2\pi ft} dt,$$

где $S(f)$ — спектральная плотность мощности радиосигнала; $s(t)$ — радиосигнал.

Таким образом, для уменьшения погрешности измерения задержки необходимо не только увеличивать эффективную ширину спектра радиосигнала, но и повышать ОСШ.

Для приближения плоской Земли инструментальная погрешность измерения высоты σ_h связана с погрешностью измерения задержки:

$$\sigma_h = \frac{c}{2 \sin \theta} \sigma_{\tau_p} (B), \quad (4)$$

где c — скорость света; θ — угол падения сигнала в точке зеркального отражения.

Таким образом, на основе известной мощности принимаемого сигнала, мощности шума, времени некогерентного накопления рассчитывается ОСШ, которое наряду с эффективной шириной спектра радиосигнала является основным при расчёте достижимой инструментальной погрешности измерения высоты бистатическим ГНСС-радиовысотомером.

Так как открытые сигналы имеют полосу частот меньше, чем сигналы высокой точности, то для достижения минимальной погрешности измерения высоты предпочтительно использовать сигналы высокой точности. Увеличение ширины спектра сигнала приводит к уменьшению погрешности измерения высоты. Поэтому с этой точки зрения предпочтительнее использовать интерференционный метод, чем метод, основанный на свёртке с локальной копией кода [11]. Таким образом, интерференционный метод обеспечит лучшую точность измерения высоты при равном ОСШ.

В таблице представлены рассчитанные инструментальные погрешности (по формуле (4)) определения высоты при приёме сигнала ГНСС со следующими параметрами: время когерентного накопления — 1 мс, время некогерентного накопления — 1 с, коэффициент усиления антенны — 17 дБ, коэффициент усиления МШУ — 20 дБ, коэффициент шума приёмного устройства — 2.

Таблица

Инструментальная погрешность определения высоты по сигналам ГНСС

Сигнал, угол падения от вертикали	Погрешность определения высоты, м
ГЛОНАСС L1, $\theta = 0^\circ$	0,52
ГЛОНАСС L1, $\theta = 35^\circ$	0,91
ГЛОНАСС L2, $\theta = 0^\circ$	0,6
ГЛОНАСС L2, $\theta = 35^\circ$	1,05
ГЛОНАСС L3, $\theta = 0^\circ$	0,28
ГЛОНАСС L3, $\theta = 35^\circ$	0,49
GPS L1, $\theta = 0^\circ$	0,16
GPS L1, $\theta = 35^\circ$	0,28
GPS L5, $\theta = 0^\circ$	0,29
GPS L5, $\theta = 35^\circ$	0,52
Galileo E5, $\theta = 0^\circ$	0,09
Galileo E5, GPS L5, $\theta = 35^\circ$	0,16

Поправка на так называемое «электромагнитное» смещение результатов измерений связана с тем, что интенсивность отражения радиоволн меняется вдоль профиля длинных поверхностных волн. Гребни волны отражают зондирующий сигнал слабее, чем впадины [12]. Это приводит к смещению измеренной высоты поверхности относительно её среднего значения. Электромагнитное смещение определяется в виде:

$$\beta_{EM} = \frac{\langle \xi \sigma_0 \rangle}{\langle \sigma_0 \rangle},$$

где σ_0 — диаграмма обратного рассеяния, полученная при приёме отражённого сигнала; $\langle \sigma_0 \rangle$ — средняя плотность мощности поперечного сечения обратного рассеяния; ξ — значимая высота волн.

Электромагнитное смещение рассчитывается с использованием численного моделирования. Для этого создаётся зависящая от времени синтетическая негауссовская отражающая поверхность моря с использованием спектров высоты поверхности [13]. Волны, рассеянные от каждой грани, вычисляются с использованием метода физической оптики в приближении Кирхгофа. Величина электромагнитного смещения может достигать величины 0,25 м при скорости ветра 15 м/с.

При погрешности оценки скорости приповерхностного ветра, получаемой с использованием сигналов ГНСС ± 2 м/с, погрешность оценивания электромагнитного смещения должна составить менее $\pm 0,03$ м.

Чтобы точно оценить задержки отражённого и прямого сигналов, следует проанализировать характеристики трассы распространения и их влияние на измерения. Основное влияние на распространение сигнала обусловлено ионосферной и тропосферной задержками, что приводит к дополнительной задержке. Погрешность учёта таких задержек важна для ГНСС-высотометрии.

Основным мешающим эффектом ионосферы является групповая задержка, влияющая на кодовую составляющую сигнала ГНСС. Ионосферная задержка зависит от частоты сигнала и ПЭС по трассе распространения [14].

Показатель преломления ионосферы зависит от частоты. Поэтому ионосферная задержка может быть устранена путём измерения псевдодальностей на двух разных частотах, усреднённых по N последовательным измерениям [9]. Погрешность определения высоты при устранении задержки в ионосфере рассчитывается, используя следующее выражение:

$$\sigma_{h_{ij}} = \sqrt{1 + \frac{1}{N(k-1)^2} + \frac{k^2}{N(k-1)^2} \frac{\sqrt{\sigma_{h_i}^2 + \sigma_{h_j}^2}}{2}}; \quad k = \frac{f_i^2}{f_j^2},$$

где $\sigma_{h_i}, \sigma_{h_j}$ — погрешности измерения высоты на частоте f_i и f_j ; N — количество последовательных измерений.

Погрешность учёта сухой тропосферной задержки составляет не более 1 см, погрешность учёта задержки во влажной тропосфере с привлечением атмосферных моделей или измерений радиометра составляет около 1 см.

Таким образом, по некоторым сигналам систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo при небольшой взволнованности отражающей поверхности можно рассчитывать на суммарную погрешность определения высоты на интервале времени 1 с не более 30 см.

Метод С/Ш

При использовании метода С/Ш анализируется изменение отношения уровня сигнала к шуму в зависимости от угла возвышения спутника, длины волны сигнала и высоты размещения приёмной антенны. Измерения данным методом могут быть реализованы с использованием одной антенны, ориентированной в «горизонт» для приёма прямых и отражённых сигналов ГНСС. Зависимость значения С/Ш от высоты размещения приёмной антенны имеет следующий вид:

$$\Delta SNR \sim A \cos(\varphi_{R_i}(t) + \varphi_0) = A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h \cos(\theta(t)) + \varphi_0\right),$$

где $\theta(t)$ — угол возвышения i -го спутника в момент времени t ; λ — длина волны сигнала; h — высота до отражающей поверхности; φ_0 — начальная фаза; A — амплитуда суммарного сигнала. Данный метод может быть использован в системах на основе отражённых сигналов ГНСС для стационарных морских уровневых постов.

Фазовый метод

Фазовые измерения имеют более высокую точность, нежели кодовые, но такие измерения неоднозначны из-за неопределённости начального целого числа периодов фазового сдвига. Но если необходимо определить изменение (приращение) высоты до отражающей поверхности, то фазовые измерения могут быть использованы как более точные.

Изменение высоты пропорционально изменению разности псевдофаз:

$$\Delta h = \frac{\Delta\varphi_i}{2 \sin \theta_i} - \frac{\Delta\varphi_j}{2 \sin \theta_j},$$

где $\Delta\varphi_i$, $\Delta\varphi_j$ — разности псевдофаз прямого и отражённого сигналов в i и j момент времени. Необходимо, чтобы при измерениях выполнялся критерий Релея. Критерий Релея выполняется при низких углах возвышения НКА и считается, что поверхность гладкая и преобладает механизм зеркального отражения [15]. Отражённые вблизи надира сигналы обычно не могут обеспечить непрерывность фазы, поскольку шероховатость поверхности увеличивает диффузную составляющую рассеяния, поэтому предпочтительнее использовать НКА с низким углом возвышения. Инструментальная погрешность фазовых измерений может составить менее сантиметра.

Определение скорости приповерхностного ветра

Информация о поле векторов скорости ветра над поверхностью Мирового океана является основной для прогнозирования погоды и климата и активно используется в метеорологических и океанографических моделях [16].

Существуют три популярных подхода для определения приповерхностного ветра из сечения обратного рассеяния. Первый подход основан на модели прямого рассеяния для моделирования частотно-временной диаграммы [7]. Эта модель генерирует рассеянную мощность частотно-временной диаграммы в зависимости от геометрических параметров, параметров приёмника, антенны и параметров отражающей морской поверхности. Параметры отражающей поверхности представляют собой так называемые среднеквадратичные уклоны морской поверхности (mss — mean square slope): неровности поверхности моря, связанные со скоростью ветра на поверхности моря [17, 18]. Поэтому mss оцениваются путём сопоставления смоделированных частотно-временных диаграмм и измеренных методом наименьших квадратов или методом максимального правдоподобия [19]. При авиационном базировании системы ГНСС-рефлектометрии изменение по частотам в частотно-временной диаграмме настолько мало, что достаточно применить сравнение смоделированных и измеренных частотно-временных диаграмм только к сигналам по задержке, а именно к рассеянной мощности как функции времени, при доплеровском сдвиге, рассчитанном для зеркальной точки [20]. Подход сопоставления с моделью может быть применён к полной частотно-временной диаграмме, а также к сигналам, полученным из частотно-временной диаграммы (то есть сигналам задержки, интегрированным сигналам задержки, сигналам доплеровского смещения частоты и т.д.). Этот подход обычно оценивает оптимальные уклоны морской поверхности, по которым в дальнейшем оценивается скорость приповерхностного ветра.

Второй тип алгоритма основан на использовании полученной частотно-временной диаграммы принятого сигнала и регрессионного анализа. Прямой наблюдаемый параметр — это величина, полученная из частотно-временной диаграммы, которая изменяется в зависимости от изменения скорости ветра и шероховатости. Примерами наблюдаемых параметров частотно-временной диаграммы являются: объём элементов разрешения (пикселей) частотно-временной диаграммы вокруг зеркальной точки [21]; различные типы расстояний, определённых по частотно-временной диаграмме [22]; наклон нарастающего края сигнала, полученного интегрированием частотно-временной диаграммы вдоль доплеровских частот, известный как интегрированный сигнал задержки [23]; ширина формы сигнала, полученная интегрированием частотно-временной диаграммы по задержкам, известная как интегрированная доплеровская форма сигнала. Подход заключается в том, чтобы вычислить эти величины на основе измеренных частотно-временных диаграмм, их регрессии

относительно скоростей ветра, измеренных локально другими приборами, и экстраполировать эти оценки на весь спектр возможных скоростей и направлений приповерхностного ветра. В этом случае отсутствует промежуточный этап расчёта уклонов морской поверхности, так как из измерений напрямую оценивается скорость ветра.

Третий подход представляет собой гибридный алгоритм, который сочетает в себе два подхода, описанных выше [20]. С его помощью экстраполируют нормированное сечение обратного рассеяния в зеркальной точке из частотно-временной диаграммы путём инверсии теоретической модели и затем применяют регрессионный анализ. Таким образом, самым простым с точки зрения реализации является первый алгоритм, который хорошо известен и отработан на измерениях, проводимых спутниками TDS-1 и CYGNSS.

Заключение

Проведённое моделирование показало, что при времени некогерентного накопления 1 с и высоте орбиты около 400 км погрешность измерения высоты геоида по отражённым сигналам ГНСС может составить менее 30 см, а при увеличении мощности передатчика на 3 дБ — менее 20 см. В настоящий момент использование системы Galileo при определении высоты геоида ГНСС-альтиметром даёт наименьшие инструментальные погрешности.

При использовании фазового метода измерения профиля высоты геоида на акватории возможно достичь сантиметрового уровня точности.

ГНСС-рефлектометрия является перспективным подходом для определения высоты приёмного устройства, скорости приповерхностного ветра, взволнованности водной поверхности. При большом числе одновременно принимаемых навигационных сигналов одна бортовая система ГНСС-высотометрии способна дать намного больше измерительной информации за один пролёт КА, чем активный альтиметр. Избыточность измерений является необходимым условием для решения задачи определения высот водной поверхностью с высокой разрешающей способностью.

Список литературы

1. Сахно И.В., Ткачев Е.А., Гаврилов Д.А., Успенский К.К. Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем // Известия вузов. Приборостроение. — 2009. — Т. 52. — № 4. — С. 34–39.
2. Awange J. GNSS Reflectometry and Applications // GNSS Environmental Sensing. Environmental Science and Engineering. — Springer, Cham, 2018. — P. 173–182.
3. Jin S., Komjathy S. GNSS reflectometry and remote sensing: new objectives and results // Advances in Space Research. — 2010. — No. 46 (2). — P. 111–117.

4. Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Лопатин В.П. Навигационная аппаратура ГНСС на борту наноспутника: возможности применения // Известия вузов. Приборостроение. — 2018. — Т. 61. — № 5. — С. 437–445.
5. Ксендзук А.В., Фатеев В.Ф., Попов С.А. Метод обработки сигналов в космических многопозиционных радиолокационных системах с синтезом апертуры антенны // Известия вузов. Приборостроение. — 2009. — Т. 52. — № 4. — С. 28–33.
6. Фатеев В.Ф., Сахно И. В. Особенности построения авиационно-космических двухпозиционных РСА с монохроматическим зондирующим сигналом: сб. трудов. — СПб.: МО РФ, 1996.
7. Zavorotny V.U., Voronovich A.G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2000. — 38. — P. 951–964.
8. Brown G.S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1977. — V. AP-25. — No. 1. — P. 67–74.
9. Rius A., Cardellach E., Martin-Neira M. Altimetric Analysis of the Sea-Surface GPS-Reflected Signals // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2010. — V. 48. — No. 4. — P. 2119–2127.
10. Перов А.И., Харисов В.Н. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования // Радиотехника. — 2010.
11. Camps A., Pascual D., Park H., Martin F. PARIS IOD: ID-16A Contribution to Performance and Error Budgets Report // ESA Project AO/1-6576/2010/F/WE-ID 51 GNSS-R-Feasibility Study (Phase A). — 2012.
12. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря: дис. д-ра физ.-мат. наук. — М.: Геофизический центр Российской академии наук, 2014.
13. Ghavidel A., Schiavulli D., Camps A. Numerical Computation of the Electromagnetic Bias in GNSS-R Altimetry // IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens. — 2016. — 54. — P. 489–498.
14. Nava B., Radicella S., Leitinger R. Use of total electron content data to analyze ionosphere electron density gradients // Adv. Sp. Res. — 2007. — V. 39. — No. 8. — P. 1292–1297.
15. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972.
16. Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А. и др. Первый российский скаттерометр орбитального базирования: численное моделирование // Изв. вузов. Радиофизика. — 2015. — 58. — № 11. — С. 935–952.
17. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // Journal of Geophysical Research 102 (C7). — 1997. — P. 15781–15796.
18. Katzberg S.J., Torres O., Ganoë G. Calibration of reflected GPS for tropical storm wind speed retrievals // Geophys. Res. Lett. — 2006. — 33. — L18602.

19. Clarizia M., Gommenginger C., Gleason S., Srokosz M., Galdi C., di Bisceglie M. Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean // *Geophys. Res. Lett.* — 2009. — 36.
20. Gleason S., Hodgart S., Yiping S., Gommenginger C., Mackin S., Adjrard M., Unwin M. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from Low-Earth Orbit, for the purpose of ocean remote sensing // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* — 2005. — 43 (6). — 1229–1241.
21. Marchan-Hernandez J., Valencia E., Rodriguez-Alvarez N., Ramos-Perez I., Bosch-Lluis X., Camps A., Eugenio F., Marcello J. Sea-state determination using GNSS-R data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* — 2010. — 7 (4). — P. 621–625.
22. Rodriguez-Alvarez N., Akos D.M., Zavorotny V.U., Smith J.A., Camps A., Fairall C.W. Airborne GNSS-R wind retrievals using delay-Doppler maps // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 2013. — V. 51. — No. 1. — P. 626–641.
23. Clarizia M.P., Ruf C., Gommenginger C., Jales P. Spaceborne GNSS-R Minimum Variance Wind Speed Estimator // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* — 2014. — V. 52. — No. 11. — P. 6829–6843.

Статья поступила в редакцию: 26.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 01.11.2021 г.

Статья принята в работу: 08.11.2021 г.