

УДК [528.225:629.783]:551.578.46
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-6-13

Опыт использования метода ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова

В. В. Калинин¹, А. В. Устинов², Н. С. Косарев^{3}*

¹ Университет Иннополис, г. Иннополис, Российская Федерация

² Филиал АО «Институт Гидропроект» – «ЦСГНЭО», г. Москва, Российская Федерация

³ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Аннотация. Высота снежного покрова является важным параметром, используемым для прогнозирования урожайности и паводков. Традиционный метод измерения высоты снежного покрова по показаниям трех снегомерных реек обладает тем недостатком, что на открытой местности снежный покров под воздействием ветра выдувается и перераспределяется. Новый метод ГНСС-рефлектометрии (ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы) позволяет обойти этот недостаток благодаря усреднению высоты снежного покрова над некоторой локальной областью вокруг антенны наземного приемника радиосигналов ГНСС. Целью исследования является оценка точности определения высоты снежного покрова методом ГНСС-рефлектометрии на примере станции IRKM (г. Иркутск) для зимнего периода 2021/2022 гг. Установлено, что стандартное отклонение высот снежного покрова, определенных методом ГНСС-рефлектометрии по результатам совместной обработки измерений радиосигналов GPS и ГЛОНАСС, от высот снежного покрова, зарегистрированных традиционным методом на метеостанции, составило 3,2 см. Стандартное отклонение высот снежного покрова, полученных по результатам обработки только радиосигналов ГЛОНАСС, составило 5,6 см. При этом для системы ГЛОНАСС очевидна зависимость расхождений с опорными данными от высоты снежного покрова: чем больше высота снежного покрова, тем меньше расхождения. Так, стандартное отклонение расхождений, полученное при условиях высоты снежного покрова выше 10 см, составляет всего 3,0 см. Таким образом, предварительно можно сделать вывод о том, что метод ГНСС-рефлектометрии способен дополнить традиционный метод измерения высоты снежного покрова.

Ключевые слова: ГНСС-рефлектометрия, GPS, ГЛОНАСС, метеостанция, высота снежного покрова, стандартное отклонение, корреляция

Введение

Под высотой снежного покрова обычно подразумевается общая высота снега на земле во время наблюдения [1]. Эта величина является важным параметром, используемым для прогнозирования урожайности и паводков. Традиционно высота снежного покрова определяется на метеостанциях как среднее значение из показаний трех снегомерных реек [2].

Недостатком этого метода является то, что на открытой местности снежный покров под воздействием ветра выдувается и перераспределяется, поэтому результаты его определения являются недостаточно достоверными. В связи с этим возникает необходимость в использовании новых автоматизированных методов определения высоты снежного покрова, в которых данная величина усредняется над некоторой локальной областью.

Одним из таких методов является метод рефлектометрии радиосигналов ГНСС. Суть метода заключается в анализе интерференционных картин, формируемых суммами радиосигналов, напрямую попадающих от навигационных спутников на антенну наземного приемника, и радиосигналов, попадающих на антенну наземного приемника после отражения от близлежащей земной поверхности.

В настоящее время метод ГНСС-рефлектометрии широко используется для определения колебаний морской поверхности, степени шероховатости водной поверхности, скорости приповерхностного ветра, солености воды, влажности почвы, характеристик льда [3–5]. Одной из первых работ по применению метода ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова была работа [6]. В ней на основе натурных измерений, проведенных в г. Колорадо (США) весной 2009 г., получена хорошая сходимости между высотой снежного покрова, измеренной тремя ультразвуковыми датчиками Campbell Scientific SR50 и оцененной с помощью метода ГНСС-рефлектометрии. В работах [7, 8] установлено, что среднее квадратическое отклонение между высотами снежного покрова, полученными референтными методами и с помощью метода ГНСС-рефлектометрии, составляет 4–10 см. В работе [9] показано, что расхождения между высотами снежного покрова, полученными по отраженным радиосигналам разных ГНСС, характеризуются среднее квадратическим отклонением в 4–7 см. При этом объединение данных разных ГНСС значительно улучшает точность относительно референтных методов. В исследовании, проведенном коллективом авторов [10], обнаружено, что погрешность измерения высоты снежного покрова мала, когда поверхность покрыта снегом, и увеличивается, когда снег тает, оставляя более шероховатую ледяную поверхность, а в работах [11, 12] представлены новые подходы для получения данных о толщине снега.

В России известны лишь отдельные работы по использованию ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова [13], а также ряд работ по определению толщины льда [14, 15]. Все это говорит о необхо-

димости проведения более полных исследований по применению метода ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова на территории Российской Федерации.

Целью настоящей работы является оценка точности определения высоты снежного покрова методом ГНСС-рефлектометрии на примере станции IRKM международной службы ГНСС, расположенной на территории астрогеодинамической обсерватории Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» в г. Иркутске.

Материалы и методы

Станция IRKM расположена в южной части Иркутска на возвышенности с абсолютной высотой 539 м. Приемная антенна станции установлена на тумбу на высоте около 3 м над поверхностью земли (рис. 1, а).

Для определения высоты снежного покрова в исследовании были использованы измеренные с шагом 30 с значения отношения несущей к плотности шума (C/N_0) для радиосигналов, передаваемых на первой частоте навигационными спутниками GPS (частота 1 572,42 МГц) и ГЛОНАСС (центральная частота 1 602 МГц). При этом в обработке измерений участвовали наиболее информативные значения C/N_0 , полученные при углах возвышения навигационных спутников от 5 до 30°.

При угле возвышения 5° и высоте приемной антенны 3 м проекция на земную поверхность первой зоны Френеля отраженного радиосигнала имеет длину около 60 м в направлении «приемная антенна – спутник» и 5 м в поперечном направлении. При угле возвышения 30° площадь проекции на земную поверхность первой зоны Френеля значительно сокращается: в направлении «приемная антенна – спутник» она имеет длину около 4 м и около 2 м – в поперечном направлении. В процессе движения спутников изменяется их возвышение и азимут, благодаря чему первые зоны Френеля отраженных радиосигналов сканируют область вокруг приемной антенны. Однако из-за топографических особенностей местности для обработки были пригодны значения C/N_0 для радиосигналов, полученных

от спутников с азимутами от 90 до 180°: в северном направлении от станции IRKM расположены объекты инфраструктуры, искажающие характер отражения, а к западу – резкий склон, что также критично для метода ГНСС-

рефлектометрии (рис. 1, б). Оставшийся юго-восточный сектор поверхности земли вокруг приемной антенны позволяет усреднить данные о высоте снежного покрова на площади около 2 800 м².



а)



б)

Рис. 1. Станция IRKM:

а) общий вид станции (фотография с ресурса [16]); б) область земной поверхности, сканируемая первыми зонами Френеля отраженных радиосигналов, использованных в исследовании

Всего для оценки высоты снежного покрова были обработаны измерения C/N_0 на станции IRKM за период с 01.11.2021 по 21.04.2022. Для обработки измерений было использовано программное обеспечение TropoGNSS, изначально разработанное для реализации метода PPP (Precise Point Positioning) и позволяющее получать высокоточные координаты наземных станций для геодинимического и геотехнического мониторинга, а также оценки содержания водяного пара в атмосфере и его градиентов [17–19]. Для реализации метода ГНСС-рефлектометрии был разработан отдельный модуль, встроенный в программное обеспечение TropoGNSS.

Обработка измеренных значений C/N_0 состоит из нескольких этапов. На первом этапе из измеренных значений C/N_0 исключается вклад радиосигналов, напрямую попавших на приемную антенну от навигационных спутников. Это выполняется путем вычитания из измеренных рядов C/N_0 значений полиномов второй степени относительно синуса угла возвышения, аппроксимирующих эти ряды для каждого спутника.

На втором этапе обработки периодическая компонента рядов C/N_0 , сформированная вследствие сложения прямых и отраженных радиосигналов при движении спутников, моделируется следующим образом [20]:

$$C/N_{0 \text{ det}}(\theta) = A(\theta) \sin(\omega T + \varphi), \quad \omega = \frac{4\pi H}{\lambda}, \quad T = \sin(\theta),$$

где $C/N_{0 \text{ det}}$ – отношение несущей к плотности шума с исключенным вкладом прямых радиосигналов; θ – угол возвышения спутника;

A – амплитуда периодической компоненты; ω – круговая частота периодической компоненты; T – параметр, являющийся сложной

функцией времени; φ – фаза периодической компоненты; H – высота приемной антенны над поверхностью снежного покрова; λ – длина волны радиосигналов навигационных спутников.

Поскольку ряды значений $C/N_0 \text{ det}$ являются данными с нерегулярной выборкой относительно параметра T , то для поиска круговой частоты и, следовательно, высоты приемной антенны над поверхностью снежного покрова используется наиболее подходящий для таких задач метод Ломба – Скаргла построения периодограмм [21, 22]. В предлагаемом алгоритме периодограммы мощности строятся для набора круговых частот, соответствующих интервалу высот приемной антенны над снежным покровом от 1 до 6 м. При этом периодограммы строятся отдельно для каждого спутника и отдельно по восходящему и нисходящему участкам траектории его движения.

На третьем этапе обработки периодограммы нормируются на единицу и усредняются. Круговая частота, для которой получена максимальная мощность на усредненной

периодограмме, пересчитывается в высоту приемной антенны над поверхностью снежного покрова. Высота снежного покрова рассчитывается как разность средней высоты приемной антенны над поверхностью земли, полученной в бесснежный период, и текущей высоты приемной антенны над поверхностью снежного покрова.

Полученные по данным ГНСС ряды высоты снежного покрова сопоставлялись с данными о высоте снежного покрова на метеостанции «Иркутск» (синоптический индекс 30710).

Результаты

На рис. 2 показаны графики высоты снежного покрова, полученные по данным метеостанции «Иркутск» и по данным отраженных радиосигналов навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС на станции IRKM. Временные ряды имеют высокий коэффициент корреляции (97 %). Стандартное отклонение расхождений рядов составляет 3,2 см, что согласуется с результатами, полученными другими авторами в приведенном выше обзоре.

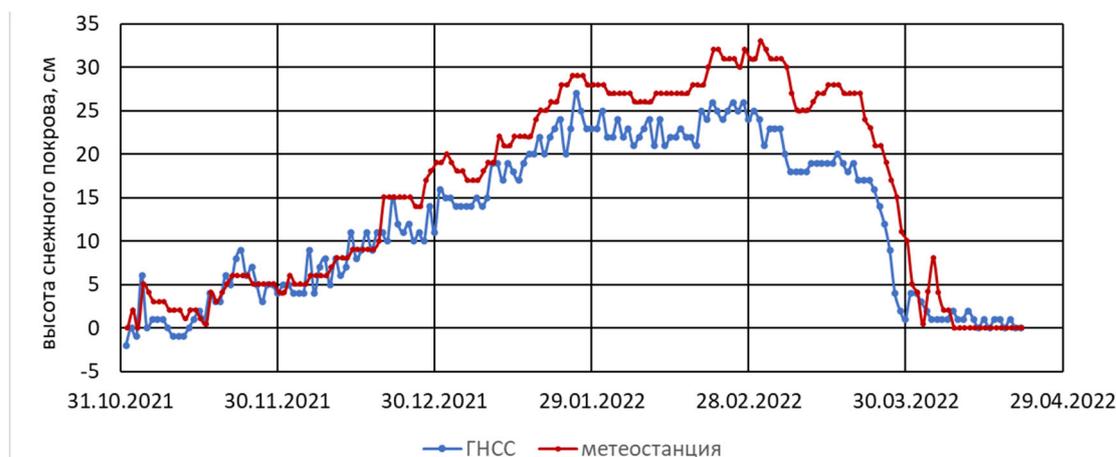


Рис. 2. Высота снежного покрова по данным ГНСС и метеостанции

Однако между рядами наблюдается некоторое смещение: высота снежного покрова по данным ГНСС в среднем на 3,6 см меньше, чем по данным метеостанции. Смещение особенно заметно в феврале и марте 2022 г. Представляется, что это не систематическая ошибка, а реальное различие в высотах снежного покрова между районами нахождения метеостанции «Иркутск» и станции IRKM.

Так, метеостанция расположена в 5,9 км к северу от станции IRKM на абсолютной высоте 469 м, то есть на 70 м ниже станции IRKM. Это обуславливает иной ветровой режим, режим таяния и уплотнения снега. В будущих исследованиях для проверки этой гипотезы планируется привлечь сведения о высоте снежного покрова, вычисленные на основе интерферометрической обработки данных ра-

диокационных спутников дистанционного зондирования Земли.

Кроме того, были рассчитаны высоты снежного покрова отдельно для системы GPS и ГЛОНАСС. Для рядов высоты снежного покрова, полученных по отраженным радиосигналам системы GPS, среднее отклонение от опорных данных метеостанции составило $-2,4$ см, тогда как стандартное отклонение сохранилось на уровне $3,2$ см. В свою очередь ряды высоты снежного покрова, полученные по измерениям отраженных радиосигналов системы ГЛОНАСС, характеризуются средним отклонением $-5,3$ см и стандартным отклонением $5,6$ см. При этом для системы ГЛОНАСС очевидна зависимость расхождений с опорными данными от высоты снежного покрова: чем больше высота снежного покрова, тем меньше расхождения. Так, стандартное отклонение расхождений, посчитанное при условиях высоты снежного покрова выше 10 см, составляет всего $3,0$ см.

Причины отмеченных особенностей требуют дальнейших исследований. Для повышения точности результатов следует разработать критерии, которые позволили бы не усреднять периодограммы, полученные по измерениям от всех доступных спутников, а выбирать только те, в которых содержится наименьший вклад искажающих факторов.

Заключение

В настоящем исследовании получены высоты снежного покрова для зимнего периода 2021/2022 гг. по данным измерений отраженных радиосигналов ГНСС в г. Иркутске. Стандартное отклонение от опорных данных метеостанции составило $3,2$ см для результатов совместной обработки измерений радиосигналов GPS и ГЛОНАСС и для результатов обработки одних только измерений радиосигналов. Стандартное отклонение результатов обработки радиосигналов ГЛОНАСС составило $5,6$ см. При этом наблюдается зависимость расхождений с опорными данными от высоты снежного покрова: чем больше высота снежного покрова, тем меньше расхождения. Таким образом, предварительно можно сделать вывод о том, что метод ГНСС-рефлектометрии способен дополнить традиционный метод измерения высоты снежного покрова.

Ввиду исключительной важности информации о высоте снежного покрова для гидроэнергетики, представляется необходимым в дальнейшем выполнить такие же исследования по данным станций ГНСС автоматизированных систем геодезического мониторинга гидротехнических сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ВМО № 8. Руководство по приборам и методам наблюдений. – Женева : Всемирная метеорологическая организация, 2017. – 1400 с.
2. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях. – Л. : Гидрометеоиздат, 1985. – 301 с.
3. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / Teunissen P. J. G., Montenbruck O. (Eds.). – Springer International Publishing AG, 2017. – 1272 p.
4. Косарев Н. С., Антонович К. М., Колмыков Р. А., Черных Д. Ю. Обзор методов ГНСС-рефлектометрии для определения колебаний высот морской топографической поверхности в России и за рубежом // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 46–60.
5. Косарев Н. С., Сипко А. И. Применение метода ГНСС-рефлектометрии для мониторинга уровня Мирового океана // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65, № 1. – С. 61–67. – DOI 10.30533/0536-101X-2021-65-1-61-67.
6. Larson K. M., Gutmann E. D., Zavorotny V. U., Braun J. J., Williams M. W., Nievinski F. G. Can we measure snow depth with GPS receivers? // Geophysical Research Letters – 2009. – Vol. 36. – P. 876–880. – DOI 10.1029/2009GL039430.
7. McCreight J. L., Small E. E., Larson, K. M. Snow depth, density, and SWE estimates derived from GPS reflection data: Validation in the western U.S. // Water Resources Research. – 2014. – Vol. 50 (8). – P. 6892–6909. – DOI 10.1002/2014WR015561.
8. Shean D. E., Christianson K., Larson K. M., Ligtenberg S. R. M., Joughin I. R., Smith B. E., Stevens C. M., Bushuk M., Holland D. M. GPS-derived estimates of surface mass balance and ocean-induced basal melt for Pine

Island Glacier ice shelf, Antarctica [Electronic resource] // Cryosphere. – 2017. – Vol. 11. – P. 2655–2674. – Mode of access: <https://doi.org/10.5194/tc-11-2655-2017>.

9. Tu J., Wei H., Zhang R., Yang L., Lv J., Li X., Nie S., Li P., Wang Y., Li N. GNSS-IR Snow Depth Retrieval from Multi-GNSS and Multi-Frequency Data [Electronic resource] // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13 (21), No. 4311. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/rs13214311>.

10. Dahl-Jensen T. S., Citterio M., Jakobsen J., Ahlstrøm A. P., Larson K. M., Khan S. A. Snow Depth Measurements by GNSS-IR at an Automatic Weather Station, NUK-K [Electronic resource] // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14 (11), No 2563. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/rs14112563>.

11. Wang F., Yang D., Zhang B., Yang L. Can sea ice thickness be retrieved using GNSS-interferometric reflectometry? [Electronic resource] // GPS Solut. – 2022. – Vol. 26 (4), No. 128. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01309-0>.

12. Altuntas C., Iban M. C., Şentürk E., Durdag U. M., Tunalioglu N. Machine learning-based snow depth retrieval using GNSS signal-to-noise ratio data [Electronic resource] // GPS Solut. – 2022. – Vol. 26 (4), No. 117. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01307-2>.

13. Сипко А. И., Косарев Н. С. Предварительные результаты применения метода ГНСС-рефлектометрии для определения высоты до отражающей поверхности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 2. – С. 150–155. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-2-150-155.

14. Михайлов М. И., Музалевский К. В., Миронов В. Л. Измерения толщины льда на пресноводном пруде и реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 14 (2). – С. 167–174.

15. Васильев Е. Н., Макаров Д. С., Сорокин А. В. Моделирование динамики ледовых покровов и ГНСС-рефлектометрия в мониторинге состояния льда // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2022. – Т. 15 (2). – С. 261–271. – DOI 10.17516/1999-494X-0389.

16. Базовая станция GNSS-измерений для передачи потребителю поправок RTK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vniiftri-irk.ru/gnss-for-rtk>.

17. Kalinnikov V. V., Ustinov A. V., Zagretdinov R. V. Results of experimental studies on the use of PPP technology for global navigation satellite systems of monitoring of Sayano-Shushenskaya HPP // Power Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 54 (2). – P. 167–171. – DOI 10.1007/s10749-020-01185-z.

18. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G. Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia [Electronic resource] // Annales Geophysicae. – 2017. – Vol. 35. – P. 453–464. – Mode of access: <https://doi.org/10.5194/angeo-35-453-2017>.

19. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G. The field of integrated water vapor over northeastern Siberia from the data of global navigation satellite systems [Electronic resource] // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – Vol. 41. – P. 665–672. – Mode of access: <https://doi.org/10.3103/S1068373916100010>.

20. Larson K. M., Wahr J., Munneke P. K. Constraints on snow accumulation and firm density in Greenland using GPS receivers // Journal of Glaciology. – 2015. – Vol. 61 (225). – P. 101–114. – DOI 10.3189/2015JoG14J130.

21. Lomb N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data [Electronic resource] // Astrophysics and space science. – 1976. – Vol. 39 (2). – P. 447–462. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/BF00648343>.

22. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophysical Journal. – 1982. – Vol. 263 (2). – P. 835–853. – DOI 10.1086/160554.

Об авторах

Владислав Валерьевич Калинин – кандидат физико-математических наук, руководитель отдела геоаучного консалтинга центра геоинформационных систем.

Александр Валерьевич Устинов – начальник отдела геодезии и геоинформационных систем (ОГиГИС).

Николай Сергеевич Косарев – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Получено 12.09.2022

© В. В. Калинин, А. В. Устинов, Н. С. Косарев, 2023

Measuring the height of snow cover using GNSS reflectometry

V. V. Kalinnikov¹, A. V. Ustinov², N. S. Kosarev^{3*}

¹ Innopolis University, Innopolis, Russian Federation

² Branch of JSC «Institute Hydroproject» – «CSGNEO», Moscow, Russian Federation

³ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Abstract. Height of the snow cover is an important parameter used to predict crop yields and floods. The traditional method of measuring the height of the snow cover according to the readings of three snow gauges has the disadvantage that in open areas the snow cover is blown out and redistributed under the influence of the wind. The new method of GNSS reflectometry makes it possible to circumvent this disadvantage by averaging the height of the snow cover over a certain local area around the antenna of the ground-based GNSS radio signal receiver. The aim of the study is to assess the accuracy of determining the height of the snow cover using GNSS reflectometry using the example of the IRKM station (Irkutsk city) for the winter period 2021/2022. It has been established that the standard deviation of heights of the snow cover determined by reflectometry of GPS and GLONASS radio signals from heights of the snow cover recorded by the traditional method at a meteorological station was 3,2 cm. The standard deviation of heights of snow cover obtained from the results of processing only GLONASS radio signals was 5,6 cm. At the same time, for the GLONASS system, the dependence of the discrepancies with the reference data on the height of the snow cover is obvious: the greater the depth of the snow cover, the smaller the discrepancies. Thus, the standard deviation of discrepancies, calculated under conditions of the height of the snow cover above 10 cm, is only 3,0 cm. Thus, it can be preliminarily concluded that the GNSS reflectometry method is able to supplement the traditional method of measuring the height of the snow cover.

Keywords: GNSS reflectometry, GPS, GLONASS, meteorological station, height of the snow cover, standard deviation, correlation

REFERENCES

1. Guide to Instruments and Methods of Observation. (2017). Geneva: World Meteorological Organization Publ., 1400 p.
2. Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 3. Part I. Meteorological observations at stations (1985). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 301 p. [in Russian].
3. Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (Eds.). Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (2017). Springer International Publishing AG, 1272 p.
4. Kosarev, N. S., Antonovich, K. M., Kolmukov, P. A., & Chernuh, D. Y. (2018) A review of GNSS reflectometry methods for determining heights of sea topographic surfaces in Russia and abroad. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 46–60 [in Russian].
5. Kosarev, N. S., & Sipko, A. I. (2021) Application of GNSS-reflectometry for monitoring world ocean level. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 65(1), 61–67. doi: 10.30533/0536-101X-2021-65-1-61-67 [in Russian].
6. Larson, K. M., Gutmann, E. D., Zavorotny, V. U., Braun, J. J., Williams, M. W., & Nievinski, F. G. (2009) Can we measure snow depth with GPS receivers? *Geophysical Research Letters*, 36, 876–880. doi: 10.1029/2009GL039430.
7. McCreight, J. L., Small, E. E., & Larson, K. M. (2014). Snow depth, density, and SWE estimates derived from GPS reflection data: Validation in the western U.S. *Water Resources Research*, 50(8), 6892–6909. doi: 10.1002/2014WR015561.
8. Shean, D. E., Christianson, K., Larson, K. M., Ligtenberg, S. R. M., Joughin, I. R., Smith, B. E., Stevens, C. M., Bushuk, M., & Holland, D. M. (2017). GPS-derived estimates of surface mass balance and ocean-induced basal melt for Pine Island Glacier ice shelf, Antarctica. *Cryosphere*, 11, 2655–2674. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/tc-11-2655-2017>.
9. Tu, J., Wei, H., Zhang, R., Yang, L., Lv, J., Li, X., Nie, S., Li, P., Wang, Y., & Li, N. (2021). GNSS-IR Snow Depth Retrieval from Multi-GNSS and Multi-Frequency Data. *Remote Sensing*, 13(21), P. 4311. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs13214311>.

10. Dahl-Jensen, T. S., Citterio, M., Jakobsen, J., Ahlstrøm, A. P., Larson, K. M., & Khan, S. A. (2022). Snow Depth Measurements by GNSS-IR at an Automatic Weather Station, NUK-K. *Remote Sensing*, Vol. 14(11), 2563. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs14112563>.
11. Wang, F., Yang, D., Zhang, B., & Yang, L. (2022). Can sea ice thickness be retrieved using GNSS-interferometric reflectometry? *GPS Solutions*, Vol. 26(4), No. 128. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01309-0>.
12. Altuntas, C., Iban, M. C., Şentürk, E., Durdag, U. M., & Tunalioglu, N. (2022). Machine learning-based snow depth retrieval using GNSS signal-to-noise ratio data. *GPS Solutions*, Vol. 26(4), No. 117. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01307-2>.
13. Sipko, A. I., & Kosarev, N. S. (2020). Preliminary results of using GNSS-reflectometry method for determining the height to the reflecting surface. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2020: Natsional'noy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: T. 1, n0. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interekspo GEO-Siberia-2020: National Scientific Conference with International Participation: Vol. 1, No. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 150–155). Novosibirsk: SSUGT Publ. doi: 10.33764/2618-981X-2020-1-2-150-155 [in Russian].
14. Mikhailov, M. I., Muzalevskii, K. V., & Mironov V. L. (2017) Measurements of ice thickness in a fresh-water pond and in a river according to the GLONASS and GPS signals. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 14(2), 167–174 [in Russian].
15. Vasil'ev, E. N., Makarov, D. S. & Sorokin, A. V. (2022) Modeling of ice cover dynamics and GNSS reflectometry in ice condition monitoring. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: tekhnika i tekhnologii [Journal of the Siberian Federal University. Series: Technique and Technology]*, 15(2), 261–271. doi: 10.17516/1999-494X-0389 [in Russian].
16. GNSS base station for transmitting RTK corrections to the user. (n. d.). Retrieved from <https://www.vniiftri-irk.ru/gnss-for-rtk> (accessed August 31, 2022) [in Russian].
17. Kalinnikov, V. V., Ustinov, A. V., & Zagretdinov, R. V. (2020). Results of experimental studies on the use of PPP technology for global navigation satellite systems of monitoring of Sayano-Shushenskaya HPP. *Power Technology and Engineering*, 54(2), 167–171. doi: 10.1007/s10749-020-01185-z.
18. Kalinnikov, V. V., & Khutorova, O. G. (2017). Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga – Ural region of Russia. *Annales Geophysicae*, 35, 453–464. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/angeo-35-453-2017>.
19. Kalinnikov, V. V., & Khutorova, O. G. (2016). The field of integrated water vapor over northeastern Siberia from the data of global navigation satellite systems. *Russian Meteorology and Hydrology*, 41, 665–672. Retrieved from <https://doi.org/10.3103/S1068373916100010>.
20. Larson, K. M., Wahr, J., & Munneke, P. K. (2015). Constraints on snow accumulation and firn density in Greenland using GPS receivers. *Journal of Glaciology*, 61(225), 101–114. doi: 10.3189/2015JoG14J130.
21. Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 39(2), 447–462. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/BF00648343>.
22. Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal*, 263(2), 835–853. doi: 10.1086/160554.

Author details

Vladislav V. Kalinnikov – Ph. D., Head of Geoscientific Consulting Department of Geoinformation Systems Center.

Alexander V. Ustinov – Head of Department Geodesy and GIS.

Nikolay S. Kosarev – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Received 12.09.2022

© V. V. Kalinnikov, A. V. Ustinov, N. S. Kosarev, 2023