

УДК 004.8

DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no5-p57](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no5-p57)

EDN: CDZKHA

Опыт использования данных спутниковой радиолокационной альtimетрии для измерения высоты снежного покрова для внутриконтинентальных районов

В. В. Калинников

В статье проведен анализ геодезических высот, полученных с помощью радиолокационного альтиметра космического аппарата Sentinel-3B за период с 29.11.2018 по 01.06.2025 для фрагмента подспутникового трека, расположенного на севере Западной Сибири. По этим данным были рассчитаны на каждую дату зондирования средние для фрагмента подспутникового трека аномалии высоты. В результате сравнения с данными о высоте снежного покрова на метеорологических станциях установлено, что вариации аномалии высоты подспутникового трека отражают межгодовые и годовые вариации высоты снежного покрова со стандартным отклонением около 0.24 м. В летних вариациях средней аномалии высоты подспутникового трека присутствует влияние вегетационного сигнала.

Спутниковая альтиметрия; высота снежного покрова; валидация.

ВВЕДЕНИЕ

Высота снежного покрова является важным параметром, характеризующим одно из звеньев гидрологического цикла. Эта величина играет значительную роль в прогнозировании стока и решении задач радиационного баланса. Стандартный метод определения высоты снежного покрова на метеостанциях заключается в усреднении показаний трех снегомерных реек [Нас85]. Автоматические методы включают применение ультразвуковых и лазерных дальномеров, измеряющих расстояние до поверхности снега вертикально вниз с платформы, установленной на известной высоте [Рук23]. Также к автоматическим методам можно отнести использование компактных FMCW-радаров, принцип работы которых основан на моделировании поглощения радиолокационного излучения в толще снега [Пом20]. К относительно новым методам относится ГНСС-рефлектометрия, суть которой заключается в анализе интерференционных картин, формируемых суммами радиосигналов систем ГНСС, напрямую попадающих от навигационных спутников на антенну приемника, и радиосигналов, отраженных от близлежащей поверхности снега [Кал23].

Перечисленные методы позволяют определять высоту снежного покрова в некоторой локальной точке или области. Для широких областей необходимо использовать методы дистанционного зондирования Земли из космоса. Часть этих методов позволяет оценить водный эквивалент снега, который может быть преобразован в глубину снега по вспомогательным данным о плотности слоя снега [Рук21]. Основным методом здесь является микроволновая радиометрия уходящего излучения в окнах прозрачности атмосферы. Наиболее известными инструментами, реализующими этот метод, являются радиометры SSM/I (Special Sensor

Microwave/ Imager) и SSMIS (Special Sensor Microwave Imager-Sounder), установленные на космических аппаратах (КА) Программы метеорологических спутников Министерства обороны США (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) [Arm94]. Также известны работы по восстановлению высоты снежного покрова по данным лидарной альtimетрии, получаемым с КА ICESat-2 [Des23, Lu22, Han20].

Спутниковая радиолокационная альтиметрия, традиционно используемая для наблюдений за топографией мирового океана, широко применяется для извлечения высоты снежного покрова над морским льдом. Принцип определения высоты снега основан на сочетании свойств радиоволн Ки-диапазона, для которых предполагается, что ровный сухой снег является прозрачным, и отражение идет от границы снег – морской лед и свойств радиоволн Ка-диапазона, которые рассеиваются на границе воздух – снег [Nan20]. Для определения положения границы воздух – снег вместо радиоволн Ка-диапазона также могут использоваться данные лидарной альтиметрии [Kac21].

Примерами спутников с бортовыми радиолокационными альтиметрами, работающими в Ки-диапазоне радиоволн, являются КА серий Cryosat и Sentinel-3. При анализе продуктов о глубине снега из данных этих спутников неоднократно исследовались вопросы об эффективной глубине рассеяния радиоволн Ки-диапазона, на которые влияют шероховатость поверхности снега, его плотность, температура, влажность и содержание солей [Nan17, Nan20, Ton21]. Эти исследования показывают неоднозначность предположения о прозрачности реального снежного покрова для радиоволн указанного диапазона. Часто отражение идет уже от уровня границы снег – воздух. Как следствие, невозможно заранее знать, на каком уровне находится эффективная поверхность отражения.

Настоящее исследование ставит своей целью оценку возможности получения высоты снежного покрова для внутриконтинентальных районов методом радиолокационной альтиметрии по данным КА Sentinel-3B. Потенциально этот метод обладает тем преимуществом, что данные возможно получать независимо от наличия облачности с регулярной частотой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использован тематический продукт об уровнях воды внутриконтинентальных гидрологических объектов, получаемый на основе данных альтиметра КА Sentinel-3B [Sen22]. Высота орбиты этого КА составляет около 814 км и имеет период повторения 27 дней. Отклонения подспутникового трека от номинального не превышают 1 км. Указанный тематический продукт содержит значения геодезических высот для подспутниковых точек, которые рассчитываются путем вычитания измеренных вертикальных дальностей КА от поверхности Земли из известных геодезических высот орбиты КА.

С помощью бортовых навигационных приемников сигналов ГНСС и DORIS орбиты КА Sentinel-3B определяются с точностью первых сантиметров. Для коррекции задержки радиолокационных импульсов в ионосфере используются глобальные карты полного электронного содержания формата IONEX, публикуемые Лабораторией реактивного движения НАСА (Jet Propulsion Laboratory, JPL). Коррекция тропосферной задержки рассчитывается через вертикальное интегрирование индекса рефракций, вычисляемого по трехмерным полям метеорологических величин Европейского центра среднесрочного прогнозирования (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF). В вычисленные геодезические высоты подспутниковых точек вводятся стандартные поправки за деформации земной коры (океанические приливные нагрузки, твердые приливы и приливные движения полюсов). Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны радиолокационного альтиметра такова, что подсвечиваемая область на поверхности Земли в направлении надира образует пятно диаметром 15 км. Благодаря режиму синтезирования апертуры разрешение вдоль трека сокращается до 330 м. Разрешение радиолокационного альтиметра по вертикальной дальности после сжатия

импульсов составляет 0.235 м. Валидации тематического продукта об уровнях воды внутриконтинентальных гидрологических объектов относительно данных гидропостов показали стандартные отклонения в широких пределах от 0.12 до 0.9 м [Hal22, Lig20].

В настоящем исследовании проанализированы данные за период с 29.11.2018 по 01.06.2025 для фрагмента одного подспутникового трека протяженностью 160 км, расположенного, как показано на рис. 1, на севере Западной Сибири между 66.7° и 68° с. ш. и 75° и 76.5° в. д.

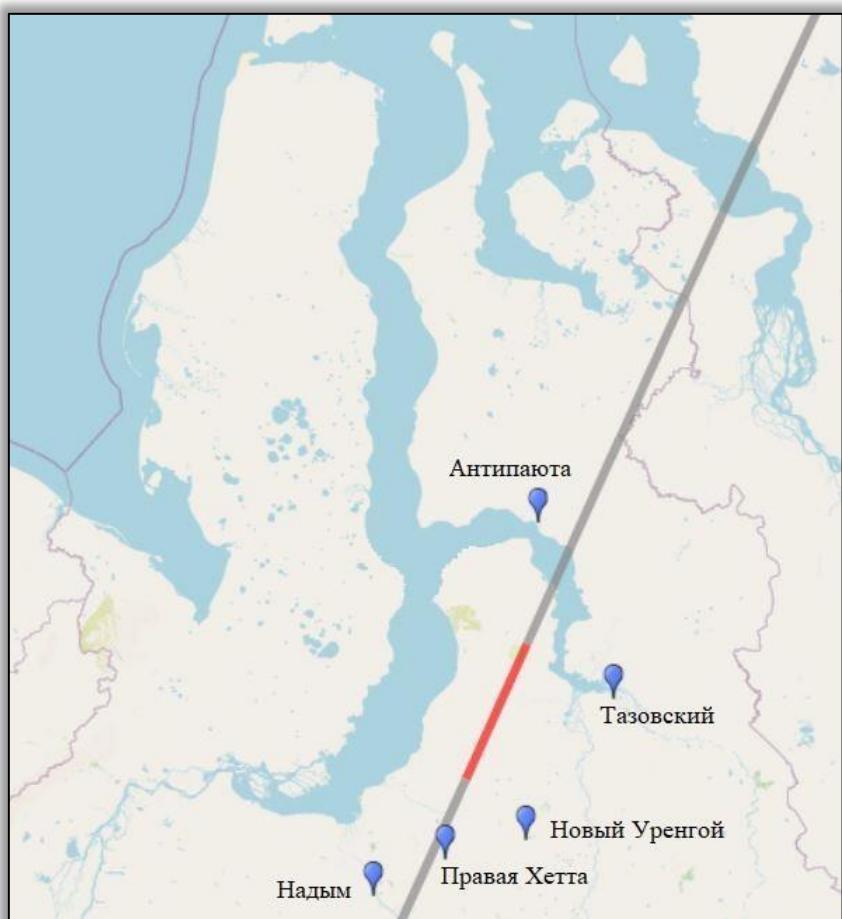


Рис. 1 Исследуемый фрагмент подспутникового трека КА Sentinel-3B
(выделен красным; синими точками показано расположение метеорологических станций)

Поскольку положения текущих треков варьируются в пределах 1 км, подспутниковые точки между текущими треками сопоставлялись на основе критерия минимального расстояния к точкам среднего (номинального) трека. Далее для каждого набора сопоставляемых точек вычислялись средняя геодезическая высота и уклон рельефа поперек трека. Поскольку в данных альтиметра присутствуют ошибки, при вычислении средних геодезических высот и уклонов итеративно исключались точки с максимальной остаточной разностью до тех пор, пока остаточные разности геодезических высот оставшихся точек не укладывались в 2-сигма интервал или до тех пор, пока стандартное отклонение остаточных разностей не достигало величины 1 м. В этой обработке стандартное отклонение остаточных разностей в среднем составило 1.8 м, а максимальное – 11.9 м.

Остаточные разности (аномалии) геодезических высот оставшихся точек усреднялись для всего фрагмента трека по датам зондирования с итеративным исключением значений, отклоняющихся более чем на 2-сигма. В итоге получены временные ряды вариаций средней аномалии высоты подспутникового трека.

Для интерпретации аномалий привлечены данные об уровне снега с пяти ближайших метеорологических станций (в скобках указан синоптический индекс) – Новый Уренгой (23358), Надым (23445), Правая Хетта (23443), Антипаута (23058) и Тазовский (23256). Метеостанции отобраны по доступности на них данных за весь исследуемый период.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Временные ряды средней аномалии высоты подспутникового трека показаны на рис. 2. Там же показаны для сравнения аномалии высоты снежного покрова по данным метеорологической станции Новый Уренгой. В таблице представлены стандартные отклонения и коэффициенты корреляции между вариациями средней аномалии высоты подспутникового трека и аномалии высоты снежного покрова по каждой метеостанции. Из графика на рис. 2 хорошо видна совпадающая годовая периодичность полученных аномалий. Также заметно, что максимумы аномалий, по данным альтиметра KA Sentinel-3B, претерпевают те же межгодовые изменения, что и максимумы аномалий высоты снежного покрова. Взаимное стандартное отклонение аномалий составляет в среднем 0.24 м, а коэффициент корреляции – 0.87. Заметно хуже стандартное отклонение и коэффициент корреляции для метеостанции Надым, так как она самая удаленная от изучаемого фрагмента подспутникового трека.



Рис. 2 Сравнение вариаций средней аномалии высоты подспутникового трека с аномалиями высоты снежного покрова на метеостанции Новый Уренгой

Таблица
Стандартное отклонение и коэффициент корреляции между вариациями средней аномалии высоты подспутникового трека и аномалии высоты снежного покрова

Метеостанция	Стандартное отклонение, м	Коэффициент корреляции
Надым	0.31	0.73
Правая Хетта	0.26	0.84
Антипаута	0.24	0.85
Тазовский	0.24	0.89
Новый Уренгой	0.22	0.87
Среднее между всеми метеостанциями	0.24	0.87

Для изучения имеющихся периодичностей ко временным рядам средней аномалии высоты подспутникового трека было применено быстрое преобразование Фурье. На рис. 3 показан полученный частотный спектр нормированных амплитуд. Здесь помимо доминирующей годичной компоненты виден второй максимум на полугодовой компоненте, который следует связать с вегетационным повышением высоты эффективной поверхности отражения в летний период.

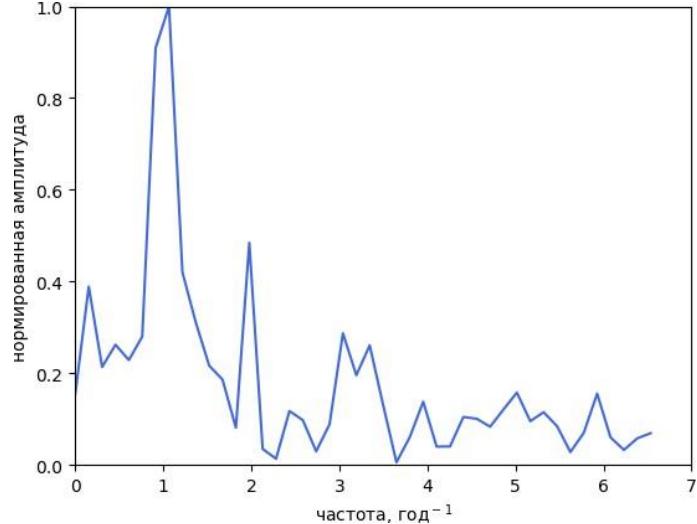


Рис. 3 Нормированный частотный спектр вариаций средней аномалии высоты подспутникового трека

На рис. 4 показаны вариации средней аномалии высоты подспутникового трека за вычетом периодических компонент с частотами 1, 2 и 3.1 год⁻¹. В оставшихся вариациях обнаруживается убывающий тренд со скоростью -0.029 ± 0.020 м/год. Можно осторожно предположить, что он отражает реальную просадку земной поверхности вследствие разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Ранее, по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии, для данной области выявлены скорости просадки 2–4 см в год [Кан09].



Рис. 4 Вариации средней аномалии высоты подспутникового трека за вычетом периодических компонент с частотами 1, 2 и 3.1 год⁻¹

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были получены временные ряды средней аномалии высоты фрагмента подспутникового трека КА Sentinel-3B, расположенного на севере Западной Сибири. Установлено, что эти аномалии отражают межгодовые и годовые вариации высоты снежного покрова со стандартным отклонением около 0.24 м. В летних вариациях аномалии присутствует влияние вегетационного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [Arm94] Armstrong R., Knowles K., Brodzik M. J., Hardman M. A. DMSP SSM/I- SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures. (NSIDC-0032, Version 2). [Data Set]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distrib-uted Active Archive Center. 1994. DOI: [10.5067/3EX2U1DV3434](https://doi.org/10.5067/3EX2U1DV3434).
- [Des23] Deschamps-Berger C., Gascoin S., Shean D., Besso H., Guiot A., López-Moreno J. I. Evaluation of snow depth retrievals from ICESat-2 using airborne laser-scanning data // The Cryosphere. 2023. 17. 2779–2792. DOI: [10.5194/tc-17-2779-2023](https://doi.org/10.5194/tc-17-2779-2023). EDN: [BWHVIH](#).
- [Hal22] Halicki M., Niedzielski T. The accuracy of the Sentinel-3A altimetry over Polish rivers // Journal of Hydrology. 2022. Vol. 606. P. 127355. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.127355](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127355). EDN: [CZYNHY](#).
- [Han20] Besso Hannah, Shean D., Lundquist J. D. Mountain snow depth retrievals from customized processing of ICESat-2 satellite laser altimetry // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 300. P. 113843. DOI: [10.1016/j.rse.2023.113843](https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113843).
- [Kac21] Kacimi S., Kwok R. Arctic snow depth, ice thickness and volume from ICESat-2 and CryoSat-2: 2018–2021 // Geophys. Research Lett. 2022. DOI: [10.1029/2021GL097448](https://doi.org/10.1029/2021GL097448). EDN: [MLKAEY](#).
- [Lig20] Jiang L., Nielsen K. et al. Evaluation of Sentinel-3 SRAL SAR altimetry over Chinese rivers // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 237. P. 111546. DOI: [10.1016/j.rse.2019.111546](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111546).
- [Lu22] Lu X., Hu Y. et al. Deriving snow depth from ICESat-2 Lidar multiple scattering measurements: uncertainty analyses // Front. Remote Sens. 2022. 3:891481. DOI: [10.3389/frsen.2022.891481](https://doi.org/10.3389/frsen.2022.891481). EDN: [HUSJXU](#).
- [Nan17] Nandan V., Geldsetzer T. et al. Effect of Snow Salinity on CryoSat-2 Arctic First-Year Sea Ice Freeboard Measurements // Journal of Geophysical Research. 2017. Vol. 44, Issue 20. DOI: [10.1002/2017GL074506](https://doi.org/10.1002/2017GL074506).
- [Nan20] Nandan V. et al. Snow Property Controls on Modeled Ku-Band Altimeter Estimates of First-Year Sea Ice Thickness: Case Studies from the Canadian and Norwegian Arctic // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. Vol. 13. Pp. 1082–1096. DOI: [10.1109/JSTARS.2020.2966432](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2966432). EDN: [EKSFHJ](#).
- [Pom20] Pomerleau P., Royer A. et al. Low Cost and Compact FMCW 24 GHz Radar Applications for Snowpack and Ice Thickness Measurements // Sensors. 2020. 20(14):3909. DOI: [10.3390/s20143909](https://doi.org/10.3390/s20143909). EDN: [IMCJGV](#).
- [Sen22] Sentinel-3 SRAL/MWR Land User Handbook, S3MPC-STM_RP_0038. Issue 1.1 – 05/12/2022
- [Ton21] Tonboe R. T., Nandan V. et al. Simulated Ka- and Ku-band radar altimeter height and freeboard estimation on snow-covered Arctic Sea ice // The Cryosphere. 2021. 15. P. 1811–1822. DOI: [10.5194/tc-15-1811-2021](https://doi.org/10.5194/tc-15-1811-2021). EDN: [ZYCQKN](#).
- Armstrong, R., Knowles, K., Brodzik, M. J. & Hardman, M. A. (1994). DMSP SSM/I- SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures. (NSIDC-0032, Version 2). [Data Set]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distrib-uted Active Archive Center. DOI: [10.5067/3EX2U1DV3434](https://doi.org/10.5067/3EX2U1DV3434).
- Deschamps-Berger, C., Gascoin, S., Shean, D., Besso, H., Guiot, A., and López-Moreno, J. I.: Evaluation of snow depth retrievals from ICESat-2 using airborne laser-scanning data, The Cryosphere, 17, 2779–2792, , 2023. DOI: [10.5194/tc-17-2779-2023](https://doi.org/10.5194/tc-17-2779-2023). EDN: [BWHVIH](#).
- Michał Halicki, Tomasz Niedzielski, The accuracy of the Sentinel-3A altimetry over Polish rivers, Journal of Hydrology, Volume 606, 2022, 127355, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.127355](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127355). EDN: [CZYNHY](#).
- Besso Hannah, Shean D., Lundquist J. D. Mountain snow depth retrievals from customized processing of ICESat-2 satellite laser altimetry. Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 300, 113843. DOI: [10.1016/j.rse.2023.113843](https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113843).
- Kacimi, S., Kwok, R. (2022), Arctic snow depth, ice thickness and volume from ICESat-2 and CryoSat-2: 2018–2021, Geophysical Research Letters. DOI: [10.1029/2021GL097448](https://doi.org/10.1029/2021GL097448). EDN: [MLKAEY](#).
- Liguang Jiang, Karina Nielsen et al. Evaluation of Sentinel-3 SRAL SAR altimetry over Chinese rivers, Remote Sensing of Environment, Volume 237, 2020, 111546. DOI: [10.1016/j.rse.2019.111546](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111546).
- Lu X., Hu Y., et al. (2022) Deriving Snow Depth From ICESat-2 Lidar Multiple Scattering Measurements: Uncertainty Analyses. Front. Remote Sens. 3:891481. DOI: [10.3389/frsen.2022.891481](https://doi.org/10.3389/frsen.2022.891481). EDN: [HUSJXU](#).
- Vishnu Nandan, Torsten Geldsetzer et al. Effect of Snow Salinity on CryoSat-2 Arctic First-Year Sea Ice Freeboard Measurements, Journal of Geophysical Research, 2017, Volume44, Issue20, DOI: [10.1002/2017GL074506](https://doi.org/10.1002/2017GL074506).
- V. Nandan et al., "Snow Property Controls on Modeled Ku-Band Altimeter Estimates of First-Year Sea Ice Thickness: Case Studies From the Canadian and Norwegian Arctic," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 13, pp. 1082–1096, 2020, DOI: [10.1109/JSTARS.2020.2966432](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2966432). EDN: [EKSFHJ](#).
- Pomerleau P., Royer A et al. Low Cost and Compact FMCW 24 GHz Radar Applications for Snowpack and Ice Thickness Measurements. Sensors. 2020; 20(14):3909. DOI: [10.3390/s20143909](https://doi.org/10.3390/s20143909). EDN: [IMCJGV](#).
- Sentinel-3 SRAL/MWR Land User Handbook, S3MPC-STM_RP_0038, Issue 1.1 – 05/12/2022
- Tonboe, R. T., Nandan, V. et al.: Simulated Ka- and Ku-band radar altimeter height and freeboard estimation on snow-covered Arctic Sea ice, The Cryosphere, 15, 1811–1822, 2021. DOI: [10.5194/tc-15-1811-2021](https://doi.org/10.5194/tc-15-1811-2021). EDN: [ZYCQKN](#).

- [Кал23] Калинников В. В., Устинов А. В., Косарев Н. С. Опыт использования метода ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова // Вестник СГУГИТ. 2023. Т. 28, № 1. С. 6–13. DOI: [10.33764/2411-1759-2023-28-1-6-13](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-6-13). EDN: [MLBNBX](#).
- [Кан09] Кантемиров Ю. И., Баранов Ю. Б., Киселевский Е. В. и др. Опыт комплексного мониторинга смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью геодезических и космических методов // Геоматика. 2009. № 1. EDN: [STTYJP](#).
- [Нас85] Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 301 с.
- [Рук21] Руководство по приборам и методам наблюдений. Т. IV – Космические наблюдения. Женева: ВМО, 2021. 113 с.
- [Рук23] Руководство по приборам и методам наблюдений. Т. II – Измерение криосферных переменных. Женева: ВМО, 2023. 113 с.
- Kalinников V.V., Ustinov A.V., Kosarev N.S. Experience in using the GNSS reflectometry method for measuring the height of snow cover // Vestnik SGUGiT. 2023. Vol. 28, no. 1, pp. 6-13. DOI: [10.33764/2411-1759-2023-28-1-6-13](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-6-13). EDN: [MLBNBX](#). (In Russian).
- Kantemirov Yu. I., Baranov Yu. B., Kiselevsky E. V. et al. Experience of complex monitoring of earth surface displacements at developed hydrocarbon deposits using geodetic and space methods // Geomatics. 2009. No. 1. EDN: [STTYJP](#). (In Russian).
- Instructions for hydrometeorological stations and posts. Vol. 3. Part I. Meteorological observations at stations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. (In Russian).
- Guide to Instruments and Methods of Observation. Vol. IV – Space Observations. Geneva: WMO, 2021. (In Russian).
- Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume II - Measurement of Cryospheric Variables. Geneva: WMO, 2023. (In Russian).

ОБ АВТОРЕ | ABOUT THE AUTHOR

КАЛИННИКОВ Владислав Валерьевич

Университет Иннополис, Россия.

v.kalinnikov@innopolis.ru ORCID: [0000-0001-6382-2309](https://orcid.org/0000-0001-6382-2309).

Руководитель направления геонаучного консалтинга. Канд. физ.-мат. наук (2013) по физике атмосферы и гидросферы.

KALINNIKOV Vladislav Valerievich

Innopolis University, Russia.

v.kalinnikov@innopolis.ru ORCID: [0000-0001-6382-2309](https://orcid.org/0000-0001-6382-2309).

Head of Geoscientific Consulting. Cand. of Physics and Mathematics (2013) in the physics of the atmosphere and hydrosphere.

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Опыт использования данных спутниковой радиолокационной альтиметрии для измерения высоты снежного покрова для внутренних районов.

Авторы: Калинников В. В.

Аннотация:

В статье проведен анализ геодезических высот, полученных с помощью радиолокационного альтиметра космического аппарата Sentinel-3B за период с 29.11.2018 по 01.06.2025 для фрагмента подспутникового трека, расположенного на севере Западной Сибири. По этим данным были рассчитаны на каждую дату зондирования средние для фрагмента подспутникового трека аномалии высоты. В результате сравнения с данными о высоте снежного покрова на метеорологических станциях установлено, что вариации аномалии высоты подспутникового трека отражают межгодовые и годовые вариации высоты снежного покрова со стандартным отклонением около 0.24 м. В летних вариациях средней аномалии высоты подспутникового трека присутствует влияние вегетационного сигнала.

Ключевые слова: Спутниковая альтиметрия; высота снежного покрова; валидация.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2025 г.

METADATA

Title: Experience of using satellite radar altimetry data to measure snow depth for inland areas.

Authors: Kalinnikov V. V.

Abstract: The article analyzes geodetic heights obtained using the radar altimeter of the Sentinel-3B spacecraft for the period from 29.11.2018 to 01.06.2025 for a fragment of the sub-satellite track located in the north of Western Siberia. Based on these data, average height anomalies for the sub-satellite track fragment were calculated for each sounding date. As a result of comparison with the data on the snow depth at meteorological stations, it was found that variations in the sub-satellite track height anomaly reflect interannual and annual variations in the snow depth with a standard deviation of about 0.24 m. The influence of the vegetation signal is present in summer variations in the average sub-satellite track height anomaly.

Key words: Satellite altimetry; snow depth; validation.

Language: Russian.

The article was received by the editors on 25 July 2025.