

## Опыт применения высокочастотного георадара для ландшафтной снегомерной съёмки в окрестностях городов Кировск (Хибины) и Апатиты

© 2021 г. Р.А. Чернов\*, А.Я. Муравьев

Институт географии РАН, 119017, Москва, Россия

\*rob31@mail.ru

## Experience in using high-frequency georadar for landscape snow survey in the vicinity of Kirovsk (the Khibiny Mountains) and Apatity (the Kola Peninsula)

R.A. Chernov\*, A.Ya. Muraviev

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*rob31@mail.ru

Received June 2, 2020 / Revised October 17, 2020 / Accepted December 22, 2020

**Keywords:** *snow cover, radar sounding, snow depth, snow density, snow pits, landscape, Khibiny Mountains.*

### Summary

The results of processing of a profile snow-measuring survey of snow cover in the Khibiny Mountains are presented. The survey was performed during the period of maximum snow accumulation (March of 2020) on the main elements of the landscape: mixed forest on the plain, open woodlands at the bottom of valleys, plateaus, wooded slopes, and upper slopes without woody vegetation. The averaged values of snow storage for different types of the landscapes were obtained for the period of the maximum snow accumulation in the snowy winter of 2019/20. The maximum snow storage (> 700 mm w.e.) was determined for areas on the high plateaus and open woodlands at the bottom of valleys. Minimum snow storage (> 400 mm w.e.) was recorded in areas of mixed forest on the plain and on an ice cover of lakes. Measurements of snow depth were carried out by the standard method (a handspike) and the ground-based radio-echo sounding using georadar with the frequency of 1600 MHz. The accuracy of this method allows measuring of the snow depth with accuracy of 1 cm for a dense snow and 2 cm for a loose one. Thus, the accuracy of measuring the snow depth with the radar is comparable to the accuracy of a handspike. A large number of radar measurements of snow depth on the profiles makes possible to determine the spatial variability of this value and its statistical characteristics. As a result, a vertical gradient of snow accumulation was defined as 25 mm w.e. per 100 m. The smallest spatial variability of snow depth was observed on profiles in the forests on the plain, in woodlands, and on the upper slopes. On profiles with complex relief (plateau, lower slopes), the spatial variability of snow depth is significant – the standard deviation was within limits of 30%. Based on the results of processing the field data, a map of snow storage over the studying area during the period of maximum snow accumulation was constructed. When constructing the map, we took into account the averaged data of the measurements for each type of landscape, the boundaries of woody vegetation, the height, steepness of slopes, and the high-altitude gradient of snow accumulation. It was found that features of the spatial distribution of snow cover were primarily due to the location of natural landscape complexes. The role of changes in snow storages with altitude was found to be insignificant.

**Citation:** Chernov R.A., Muraviev A.Ya. Experience in using high-frequency georadar for landscape snow survey in the vicinity of Kirovsk (the Khibiny Mountains) and Apatity (the Kola Peninsula). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021. 61 (1): 103–116. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421010074.

*Поступила 2 июня 2020 г. / После доработки 17 октября 2020 г. / Принята к печати 22 декабря 2020 г.*

**Ключевые слова:** *снежный покров, радиолокационные измерения, толщина снежного покрова, плотность снега, снежные шурфы, ландшафт, Хибины.*

Исследовано пространственное распределение снежного покрова с помощью высокочастотного георадара в период максимальных снегозапасов в Хибинских горах в многоснежную зиму 2019/20 г. Наблюдения в смешанном лесу, редколесье на дне долин, на плато, залесённых и оголённых склонах показали, что распределение снежного покрова обусловлено прежде всего естественными границами природных ландшафтных комплексов. Изменение снегозапасов с высотой выражено лишь на отдельных протяжённых склонах.

### Введение

Снежный покров – важный элемент ландшафта; он участвует в формировании растительного и почвенного покровов, определяет

температурный режим грунтов и многолетней мерзлоты. Недостаточная изученность современного состояния снежного покрова материковой части Евразийской Арктики затрудняет эффективное освоение арктических территорий.

Снежный покров в Хибинских горах распределён крайне неравномерно из-за сильной расчленённости рельефа и метелевого переноса снега. Значительную изменчивость его пространственных характеристик — толщину, плотность и связанных с ними механических свойств — отмечали и ранее [1, 2]. Некоторое представление о максимальных снегозапасах и лавинной активности в Хибинах позволяют получить карты атласа [3]. Однако из-за мелкого масштаба карты максимальных снегозапасов (1:10 000 000) детальных данных о распределении снежного покрова в Хибинах здесь не приводится, а величина максимальных снегозапасов определяется как «более 200 мм слоя воды» для всего горного массива.

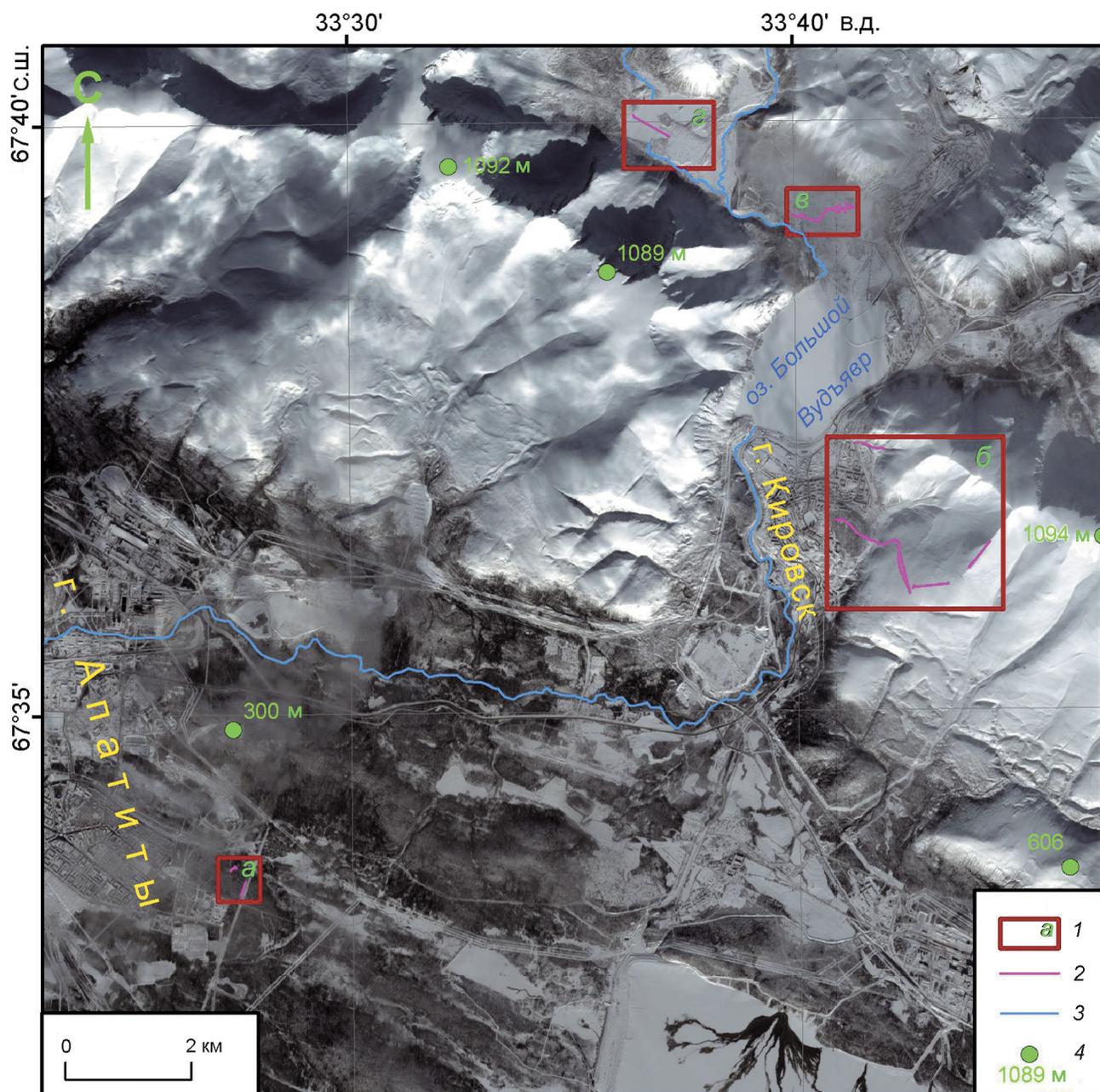
Сложный рельеф, значительное количество твёрдых осадков, выпадающих в Хибинах, и пространственное перераспределение снега способствуют образованию лавин разного типа [4, 5]. Работы по изучению снежного покрова с целью прогноза лавинной опасности начаты здесь почти 100 лет назад, накоплен значительный материал, в том числе благодаря Хибинской учебно-научной базе МГУ (ХУНБ). Фактический материал по снежному покрову отражён в редких публикациях на основе мониторинга в долине оз. Большой Вудъявр и на отдельных склонах в окрестностях города Кировск.

Снежный покров Хибин изучался также для оценки изменений климата в Субарктике. Выделены тенденции в изменении снежности зим и зимних температур по данным метеостанций (ГМС) Кольского полуострова [4, 6, 7], что вполне согласуется с общими тенденциями на севере Русской равнины [8]. Охват исследований изменчивости снежного покрова Хибин очень разный. Обработка спутниковых снимков и обобщение полученных ранее сведений о характеристиках снежного покрова позволили делать лавинные прогнозы в зависимости от зимних условий [5] в масштабах всего горного массива. Напротив, исследования пространственной изменчивости снежного покрова в масштабах склона или лавиносбора выполняли для решения задач лавиноведения [9]. Прежние оценки средней толщины снежного покрова были даны с учётом ландшафтного разнообразия Хибинских гор [10, 11], однако данных о снегомерных съёмках в период максимального снегонакопления опубликовано мало.

Большинство авторов отмечают, что к основным факторам изменчивости характеристик снежного покрова относятся сложный рельеф и режим снегонакопления; последний определяется частой сменой погодных условий, что характерно для Кольского полуострова. Несмотря на доступность Хибинских гор, масштабные снегомерные съёмки в условиях Хибин — крайне трудоёмкая задача. Периоды устойчивой погоды, как правило, кратковременны, и традиционные снегосъёмки не позволяют исследовать обширную территорию. Применение радиолокации для исследования снежного покрова даёт возможность в короткий срок собрать обширный материал [12]. Правда, в этом случае значительное время уходит на обработку данных, так как число полученных измерений увеличивается в тысячи раз. Использование высокочастотного георадара «Пикор-Лёд» для снегомерной съёмки в многоснежную зиму показало значительные преимущества наземного радиозондирования по сравнению с традиционной снегосъёмкой — время измерений на каждом профиле значительно сократилось. При этом точность измерений толщины снежного покрова с помощью радиолокации сопоставима с измерением шупом. Основная цель настоящей работы — определить средние значения снегозапасов на рассматриваемой территории с учётом особенностей распределения снежного покрова на период максимума снегонакопления.

### Характеристика района исследований

Хибин — горный массив на Кольском полуострове в 150 км к северу от Полярного круга, характеризующийся платообразными сглаженными вершинами высотой до 1190 м. Здесь развиты широкие троговые долины, цирки и кары с крутыми склонами. Климатическое влияние Атлантики и Арктического бассейна способствует значительному накоплению снега и продолжительной зиме. Устойчивый снежный покров образуется в конце октября — начале ноября и держится до начала мая. В отдельные годы сроки схода снега отмечены во второй половине мая, а на горных плато снег лежит до июня. Продолжительность зимнего периода — более 210 дней. Устойчивые отрицательные температуры воздуха характерны с ноября по апрель.



**Рис. 1.** Участки ландшафтной снегосъёмки в 2020 г.:

1 – участки работ; 2 – профили измерений; 3 – реки; 4 – абсолютная высота, м

**Fig. 1.** Areas of snow mapping of landscapes in 2020.

1 – work sites; 2 – measurements profiles; 3 – rivers; 4 – elevation, m

По архивным данным ГМС Апатиты [13], с 2010 по 2020 г. температуры зимнего периода (ноябрь–апрель) изменялись от  $-6,5$  до  $-9,2$  °С. С зимы 2014/15 г. отмечается тренд к похолоданию: за последние годы температура понизилась приблизительно на 1 °С. При этом сумма зимних осадков остаётся прежней. Среднее значение максимальной толщины снежного покрова на ГМС Апатиты

в 2010–2020 гг. – 84 см. Однако зима 2019/20 г. оказалась значительно более снежной – максимальная толщина снежного покрова увеличилась до 99 см. В окрестностях Кировска толщина снега превышала 1 м, а на отдельных участках была более 2,5 м. Снегомерные работы проводили в окрестностях городов Кировск и Апатиты (южная часть Хибин) на различных ландшафтных участках (рис. 1).

## Данные и методы

В работе использованы результаты съёмки снежной толщи георадаром «Пикор-Лёд» (многофункциональный контрольно-индикационный прибор «Пикор-Лёд», ТУ 6683-002-092550026-2015, предприятие-изготовитель ООО ФПК «ЭСТРА»), выполненной в марте 2019 и 2020 гг. в окрестностях городов Кировск и Апатиты в различных ландшафтных условиях. Толщина сезонного снежного покрова в районе исследований в марте близка к максимальной. Отсутствие таяния снега позволяет успешно использовать высокочастотный георадар для зондирования снежной толщи. Радар «Пикор-Лёд» предназначен для подповерхностного зондирования льда, снега и других материалов природного и техногенного генезиса с низким влагосодержанием. Согласно паспортным данным, его центральная частота – 1600 МГц, точность измерений толщины льда – 1–2 см, а минимальный размер объекта исследований (разрешающая способность) – 3 см. По данным производителя, прибор позволяет определять толщину льда в диапазоне 5–200 см, а толщину снега – в диапазоне 5–300 см [14]. В зависимости от характера поверхности прибор можно переносить на руках, на кронштейне или устанавливать на сани.

Настройки программного обеспечения георадара позволяют работать со снежным покровом в широком диапазоне его толщины и плотности. Опыт использования прибора в арктических условиях показал, что с его помощью можно измерять снежный покров в эрозионных врезках толщиной до 8 м [15]. Положения границ снежной толщи непрерывно отображаются на экране компьютера в виде гиперболических отражений и маркируются линиями раздела слоёв (сред). Численное значение текущей толщины показывается на экране. Это позволяет в режиме реального времени оценивать измеряемую величину, особенности положения границ, а при необходимости ставить метки контрольных точек непосредственно в записи. В дальнейшем в процессе обработки данных радарограмм выделяли стабильные границы в соответствии с гиперболическими отражениями, записанными в формате DEL. Границы поверхности и основания снежного покрова на радарограммах корректировали вручную, так как автоматизированное определе-

ние данных границ в программном обеспечении «Пикор-Лёд 4.1» даже при оптимальных настройках имеет погрешности. В большинстве случаев вылеты такого определения границ легко восстановить визуально в записи отражений, а их суммарная длительность не превышает 10–15% длины записи радарограмм. Причина появления вылетов связана со случаями, когда значения плотности снега между слоями или с подстилающей поверхностью отличаются мало. Корректировка вылетов вносит незначительные изменения в средние величины. Если эта процедура выполняется одним оператором, то различия средней толщины не превышают 0,5%.

На погрешность результата сильнее всего влияет диэлектрическая проницаемость снега, величина которой зависит от плотности и структуры снежного покрова. Величина диэлектрической проницаемости устанавливается в настройках перед началом съёмки. Для подбора её значений необходимы предварительные измерения толщины щупом и проверка показаний георадара на экране. Другие настройки георадара (число регистрируемых границ, чувствительность, вертикальный масштаб шкалы экрана) также выбираются на основе предварительных измерений щупом. Результаты дешифрирования радарограмм экспортируются в обменный формат. Дальнейшую статистическую обработку данных проводили в редакторах электронных таблиц Microsoft Excel и LibreOffice Calc. Для уточнения диапазона настроек радара пройдены и исследованы тестовые профили на плотном и рыхлом снегу. Длина профилей измерялась рулеткой, а проверочные измерения щупом проводили с шагом 1 и 5 м в зависимости от изменения толщины снега по профилю. Для определения плотности снега в слоях и характера подстилающей поверхности были пройдены шурфы. Дополнительно рассмотрены возможности использования радара в руках оператора и на санях-волокушах. В большинстве случаев в условиях горного рельефа предпочтительнее было нести оборудование на руках. Таким образом была проведена подготовка к измерениям на ландшафтных профилях в Хибинах.

Выбор участков ландшафтной снегосъёмки основан на результатах ландшафтного районирования [10]. Участки работ определены заранее в ноябре 2018 г. до начала формирования снеж-

Таблица 1. Толщина снежного покрова на различных ландшафтных участках Хибин в марте 2020 г.\*

Ландшафтные участки (комплексы) и опытные площадки	Высотный диапазон профилей и площадок, м	Длина профиля $L$ , м	Измерения георадаром «Пикор-Лёд» на профиле				Измерения щупом в отдельных точках на профиле		
			$\varepsilon$	$N$	$Hc$ , см	$\sigma$ , см	$N$	$Hc$ , см	$q$ , %
Смешанный лес на равнине	190–195	200	1,3	9800	130,4	8,6	61	121	8
Нижние склоны	380–450	420	1,5	19000	196,3	53,6	6	161	22
Верхние склоны	500–860	800	1,5	30000	138,2	31,2	31	138	1
Плато	855–895	520	1,7	10000	175,0	42,9	5	182	4
Днища долин	310–330	1400	1,5	25000	203,0	10,7	16	205	1
«Зимник»	190–200	300	1,7	8750	71,8	6,1	4	72	1
«Трасса»	200	220	1,5	5000	98,6	5,9	5	98	1

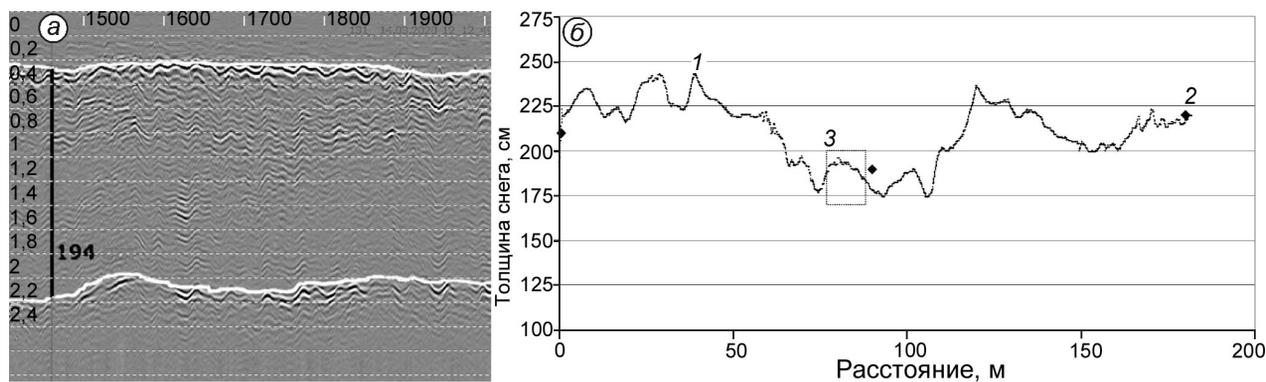
\* $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $N$  – число измерений;  $Hc$  – средняя толщина снежного покрова;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение на профиле;  $q$  – относительное отклонение от среднего значения измерений георадаром.

ного покрова, что позволило выделить основные типы ландшафтов района исследований и наметить расположение профилей снегомерной съёмки. Съёмка проводилась по линейным профилям разной протяжённости (до 1400 м), которая, как правило, не превышала 300 м. Длина профиля определялась условием ландшафтной однородности рассматриваемого участка. Всего выполнено 50 радарных профилей с тестовыми измерениями щупом на пяти характерных участках ландшафта Хибин: смешанный лес; днища долин (преимущественно заняты редколесьем); залесённые склоны; склоны выше леса; горные плато. Отдельные измерения выполняли на поверхности озёр. Радиолокационную запись на профиле вели непрерывно, её состояние проверяли визуально на экране компьютера, где были отражены текущие границы и толщина снежного покрова. Возможность контролировать границы и толщину снега в режиме реального времени существенно упрощает процесс настройки радара и измерений. Измерения щупом выполнены с разным шагом на границах профиля и в случайных точках. На тестовых профилях снежного покрова измерения щупом проводили с разным шагом (около 5 м) в смешанном лесу на равнине вблизи г. Апатиты. Тестовый профиль отмеряли рулеткой, измерения радаром и щупом вели при разных настройках с целью выбора оптимальных. Наилучший результат давало расхождение двух методов в определении средней толщины снежного покрова приблизительно в 1%.

На профилях в Хибинах измерения проводили радаром. С помощью щупа выполняли выборочную проверку в случайных точках на каждом профиле, как правило, 2–3 измерения на 100 м

профиля. Это связано с объективными трудностями ручных измерений при толщине снега более 2 м. Критерием служила величина средней ошибки выборки из генеральной совокупности данных. При этом средняя ошибка выборки была меньше, чем приемлемая погрешность измерений. Желаемый результат – различия двух методов менее 10%. Средняя ошибка выборки рассчитывалась на основе значений среднее квадратичного отклонения толщины снежного покрова и числа точек измерения щупом. В табл. 1 приведены эти значения для профилей. Измерения щупом проводили параллельно измерениям радаром, так как положение точек маркировалось на поверхности снега в тот момент, когда в записи ставилась метка на радарограмме. Оптимальные настройки георадара подбирали в начальной точке каждого профиля по совпадению толщины снежного покрова. Пространственное положение всех профилей во время съёмки фиксировали с помощью GPS-навигатора. Погрешность измерений георадаром оценивалась согласно методике радиолокационных измерений снежного покрова на ледниках [16, 17].

На каждом исследуемом участке выполнены исследования характеристик снежного покрова в шурфах. Стратиграфию снежной толщи описывали по методике Международной классификации сезонно-выпадающего снега [18]. Для оценки средних снегозапасов горной территории выделено несколько типов ландшафтов: верхние (безлесные) склоны; нижние (залесённые) склоны; платообразные горные вершины; равнинные участки днищ долин (преимущественно заняты редколесьем); озёра; техногенно преобразованные ландшафты (населённые



**Рис. 2.** Фрагмент радарограммы (а) и толщина снежного покрова на плато (б):

1 – толщина снежного покрова по георадару; 2 – контрольные измерения шупом; 3 – участок, показанный на радарограмме; см. текст

**Fig. 2.** Fragment of the radar recording (a) and the thickness of the snow cover at plateau (б):

1 – thickness of the snow cover by radar; 2 – control measurements with a probe; 3 – the section shown on the radar recording; see text

пункты, промышленные зоны, карьеры, отвалы, железные и автомобильные дороги и т.п.). Дешифрирование границ разных ландшафтов и озёр выполняли в ручном режиме по спутниковому снимку *Pleiades-1A* от 26.07.2017 (ортопродукт) с пространственным разрешением 2 м в мультиспектральном диапазоне и разрешением панхроматического канала 0,5 м. Дополнительно использовали результаты обработки мозаики цифровой модели рельефа *ArcticDEM v3.0* [19] с пространственным разрешением 10 м – растровые изображения экспозиции и уклонов поверхности района исследований. Также по *ArcticDEM v3.0* были построены изогипсы поверхности и определены средние высоты различных типов ландшафтных комплексов (как среднее значение высот ячеек ЦМР в пределах их границ). За склоны принимались поверхности с углами наклона более  $10^\circ$ . Днища долин и платообразные горные вершины были ограничены наклоном поверхности менее  $10^\circ$ . Высокое пространственное разрешение спутникового снимка позволяло уверенно опознавать на нём древесную растительность.

### Результаты и обсуждение

Полевые исследования снежного покрова проводили в окрестностях городов Кировск и Апатиты с 11 по 15 марта 2020 г. Как уже отмечалось, толщину снежного покрова измеряли в пределах разных типов ландшафтов на заранее намеченных профилях. На каждом профиле измеряли

толщину снежного покрова георадаром и шупом. Плотность снега и его структурные характеристики определяли в шурфах. На каждом ландшафтном участке проходили не менее двух шурфов. Настройки георадара подбирали с учётом наилучшего совпадения толщины снежного покрова, измеренной двумя способами. Пример фрагмента записи радарограммы и толщины снежного покрова на участке плато (высота 890 м) показан на рис. 2. На радарограмме (см. рис. 2, а) границы снежного покрова проведены автоматически на основе программного обеспечения «Пикор-Лёд». Вертикальная шкала строится автоматически, на ней указана толщина снежного покрова в метрах (слева); цифра «194» на мониторе указывает толщину снежного покрова в точке измерения. Поле радарограммы показывает внутренние отражения в слоях снежного покрова, которые в данном примере практически не наблюдаются, так как снежная толща на плато сложена метелевым снегом и имеет однородное строение без чётких границ разновозрастных слоёв. Обработка радарограммы показана в виде графика изменения толщины снежного покрова на части профиля на плато (см. рис. 2, б). Фрагмент записи (см. рис. 2, а) относится к центральному участку профиля (см. рис. 2, б). Точками показаны значения тестовых измерений толщины шупом.

Предварительный анализ полученных данных съёмки георадаром «Пикор-Лёд» показал, что автоматическое определение границ кровли и подошвы снежного покрова в программе «Пикор-Лёд» (входит в комплектацию георада-

ра) в отдельных случаях даёт неудовлетворительный результат, поэтому для установления непрерывных границ необходимо проверять всю запись на профиле и исправлять «провалы границ» вручную. Эта процедура значительно улучшает результат дешифрирования границ снежного покрова, так как случайный сбой сигнала исключается. Характеристики участков, на которых проведены измерения, а также результаты обработки радарограмм и измерений толщины снежного покрова шупом приведены в табл. 1.

Длина профилей сильно различалась, что связано прежде всего с пространственной однородностью участков и трудоёмкостью измерений шупом. Опытные площадки «Зимник» и «Трасса» в лесной зоне использованы для настройки георадара. В процессе работ отмечено, что пространственная изменчивость толщины снежного покрова на подготовленной лыжной и снегоходной трассах невелика, поэтому был выполнен ряд повторных измерений георадаром и шупом для настройки георадара. В настройках георадара значения диэлектрической проницаемости, числа импульсов и чувствительности приёма сигнала подбирали таким образом, чтобы на уплотнённом снегу трассы различия в толщине снежного покрова, измеренные георадаром и шупом, были минимальны – около 1–2 см. Определение диапазона изменчивости этих параметров для уплотнённого снега («Зимник» и «Трасса») и для рыхлого снега под пологом леса позволили в дальнейшем сократить время настройки георадара на других участках.

Общие черты распределения снежного покрова в ландшафте в снежную зиму 2019/20 г. выявили значительные ландшафтные различия в снегозапасах. В целом распределение снежного покрова в многоснежную зиму соответствует выявленному ранее распределению в нормальные зимы [10], но выражено оно более явно. Эти различия отмечены не только на профилях, но и в шурфах. В табл. 2 приведены значения толщины, плотности и снегозапасов, полученные в шурфах, а также структурные характеристики снежного покрова.

Наибольшие средние значения толщины снежного покрова были установлены в нижних частях склонов, на плато и в редколесье на дне долины; наименьшие значения естественного снежного покрова – в смешанном лесу на рав-

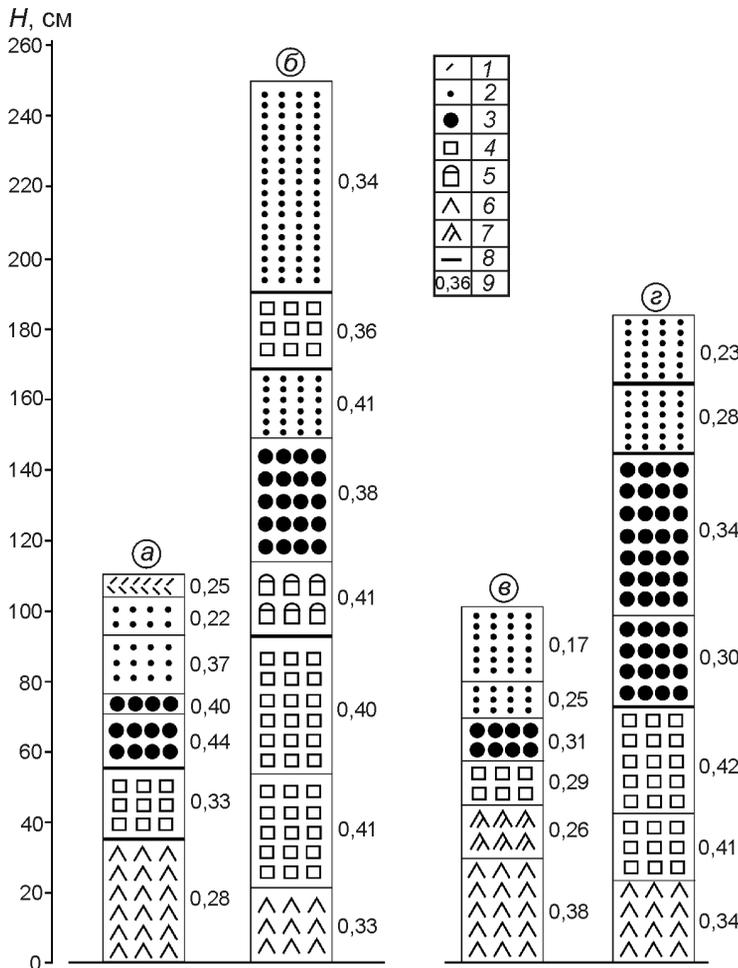
Таблица 2. Физико-механические и структурные характеристики снежного покрова, полученные в шурфах на каждом участке

Ландшафтные участки (комплексы)	Средние характеристики снежного покрова в шурфах (12–15 марта 2020 г.)*				
	$H_c$ , см	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$W$ , мм в.э.	$\kappa$ , %	$D_{max}$ , мм
Смешанный лес на равнине	140	0,28	392	32	1
Нижние склоны	155	0,31	474	7	1,2
Верхние склоны	136	0,33	448	49	1,5
Плато	250	0,38	949	21	1
Днища долин	184	0,35	628	13	1,5
«Зимник»	60	0,43	255	0	1
«Трасса»	110	0,33	369	60	2

\* $H_c$  – толщина снега;  $\rho$  – плотность снега;  $W$  – снегозапас в шурфе;  $\kappa$  – доля слоёв снега, находящихся в стадии конструктивного метаморфизма: отношение толщины этих слоёв ко всей толщине снежного покрова;  $D_{max}$  – размер кристаллов.

нине. Пространственная изменчивость толщины снежного покрова характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  (см. табл. 1), которая оказалась максимальной для профилей, расположенных в нижней части склонов. Это обусловлено сложным рельефом подстилающей поверхности. На таких участках профили неоднократно пересекали эрозионные врезы и толщина снежного покрова варьировала в диапазоне от 1,1 до 2,5 м. Поскольку контрольные измерения шупом не охватывали участки врезав, замётённых снегом, различия средних величин, полученных разными методами, оказались значительными – 22% (см. табл. 1, величина  $\rho$ ). Определение толщины снежного покрова разными методами показало, что при небольших значениях  $\sigma$  различия в средних величинах минимальны. Так, для участков верхней части склонов, в редколесье на дне долин и на опытных площадках различие средней толщины снежного покрова, измеренной разными способами, было в пределах 1%, что даже меньше инструментальной погрешности обоих методов.

В каждом типе ландшафта были получены средние значения плотности снега в шурфах. Зимой 2019/20 г. снежная толща развивалась по типу уплотнения, а рост кристаллов снега в слоях был замедлен. Основная причина этого – чрезвычайно снежная зима: количество осадков в этот год превысило норму в 1,44 раза. На горных плато толщина снежного покрова достигала



**Рис. 3.** Стратиграфический разрез снежного покрова на плато (высота 890 м):

*a* – 26.03.2019 г.; *б* – 13.03.2020 г.; в редколесье на дне долин (высота 320 м) в окрестности г. Кировска: *в* – 27.03.2019 г., *з* – 13.03.2020 г.

Условные обозначения согласно [18]: 1 – частично разрушенные снежинки; 2 – мелкие округлые частицы; 3 – крупные округлые частицы; 4 – оgranённые кристаллы; 5 – округляющиеся оgranённые кристаллы; 6 – глубинная изморозь; 7 – цепочки кристаллов глубинной изморози; 8 – ледяной слой; 9 – плотность снега в слое, г/см<sup>3</sup>

**Fig. 3.** Stratigraphy of the snow cover on the plateau:

*a* – 03/26/2019; *б* – 03/13/2020; in the open woodland at the bottom of the valleys (altitude 320 m) in the vicinity of Kirovsk city: *в* – 27/03/2019, *з* – 13/03/2020.

Legend in accordance with [18]: 1 – small rounded particles; 2 – large rounded particles; 3 – partly decomposed precipitation particles; 4 – faceted crystals; 5 – rounding faceted particles; 6 – depth hoar; 7 – chains of depth hoar; 8 – ice layer; 9 – snow density in layer, g/cm<sup>3</sup>

2,5 м, в редколесье на дне долин она составляла 1,8 м, в лесной зоне на равнине – 1,1–1,4 м. Плотность снежного покрова определялась как средняя плотность по шурфу с учётом вклада плотности каждого слоя снега и ледяных корок. В шурфах выполнены исследования характеристик снежного покрова, проведены измерения толщины, плотности слоёв снега и оценены средние размеры кристаллов (см. табл. 2). Различия средней плотности при сравнении лесного участка на равнине, редколесья на дне долин и склонов оказались небольшими. Самая значительная плотность снега отмечена на плато, чему способствуют уплотнение снега под влиянием ветра и давление массы вышележащих слоёв. На площадке «Зимник» большая плотность снега определена механическим уплотнением снега снегоходной техникой.

В марте 2020 г. шурфы были пройдены в тех же точках, что и в марте 2019 г. Это позволило сравнить строение снежной толщи в нормаль-

ную и многоснежную зимы. Наибольшие различия отмечаются в лесной зоне на равнине, где ветровое уплотнение минимально и дополнительное накопление снега заметно сказывается на условиях метаморфизма. Менее заметные различия обнаружены при сравнении горных участков, где первоначальное ветровое уплотнение слоёв случается часто. Стратиграфия снежного покрова для плато и редколесья на дне долин по данным исследования проб шурфов, пройденных в марте 2019 и 2020 гг., приведена на рис. 3. Условные обозначения в стратиграфических разрезах даны в соответствии с Международной классификацией сезонного снега [18]. Доля слоёв снега в стадии конструктивного метаморфизма зимой 2019/20 г. была невелика, максимальные размеры кристаллов снега, отмеченные в нижних слоях, не превышали 1,5–2,0 мм (см. табл. 2 и рис. 3).

В марте 2020 г. снежная толща на всех участках была сложена слоями зернистого снега под-

класса *RGl<sub>r</sub>*, в верхней части разреза — *RGxf*, а в нижней части — ограниченными кристаллами *FCso* и *FCxr*. Небольшие кристаллы глубинной изморози *DHcp* обнаружены в нижнем слое всех шурфов и только на участке с механическим уплотнением снега; размер кристаллов глубинной изморози был около 2 мм (см. табл. 2). Плотность снега в разрезе (цифры справа от стратиграфического разреза, см. рис. 3) увеличивается с глубиной до больших значений — 0,44 г/см<sup>3</sup>. Тонкие ледяные корки толщиной менее 0,3 мм встречаются редко. В марте 2019 г. на тех же участках снежная толща была более стратифицирована как по разнообразию кристаллов снега, так и по плотности.

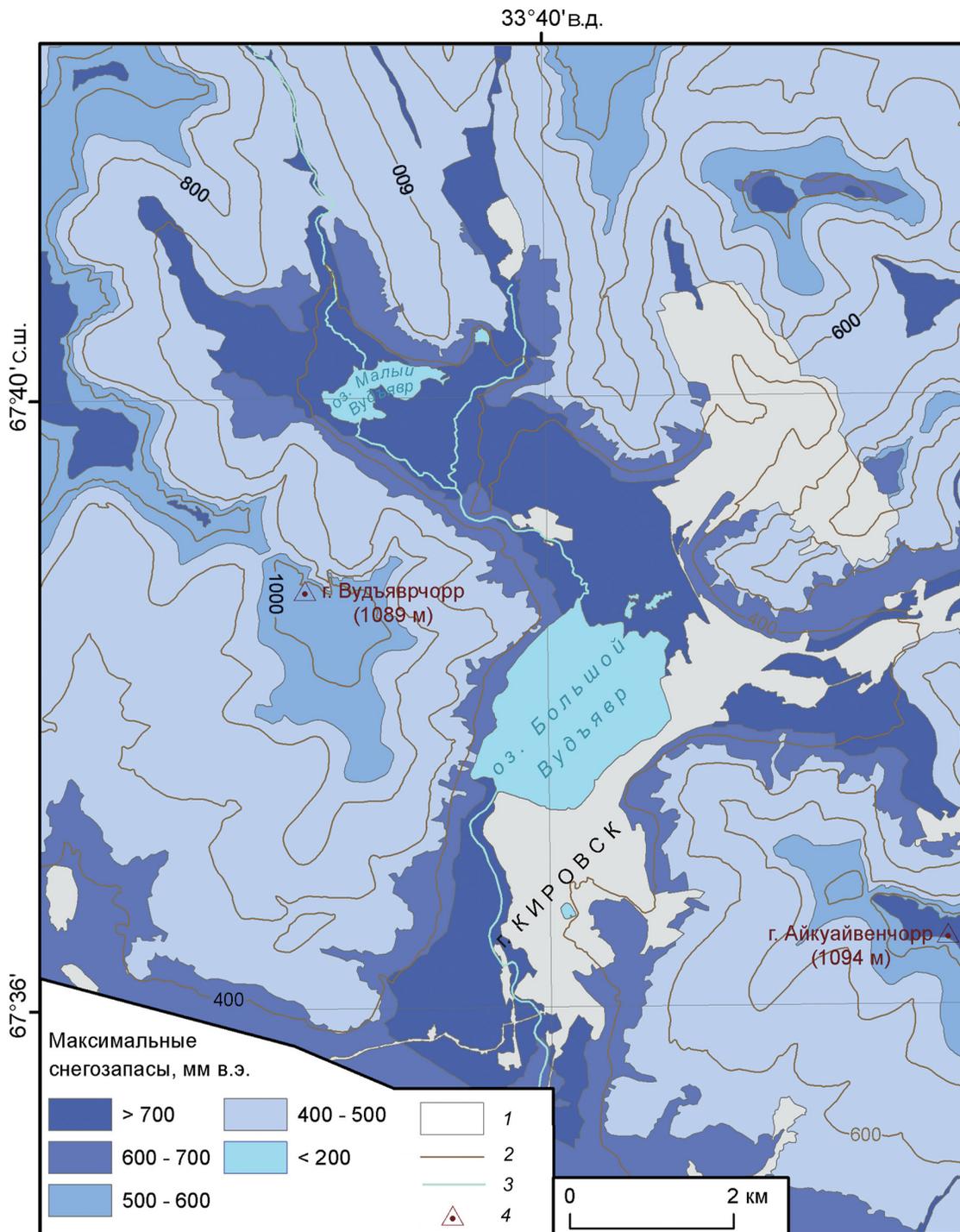
Несмотря на значительные различия зим по количеству осадков, оказалось, что снежная толща сохраняет общие черты развития — в нижних слоях формируется горизонт вторично-идиоморфных форм кристаллов разной стадии развития. Этот горизонт мало уплотняется со временем. Верхний горизонт сложен плотными слоями, формирующимися при ветровом воздействии и при действии оттепелей. Скачки плотности в нижних слоях снежного покрова обнаружены в записи регистрируемых границ георадаром, особенно на участке «Трасса», где мощный горизонт глубинной изморози перекрыт плотным слоем снега. Это позволяет в дальнейшем рассмотреть возможность определения толщины слоя разрыхления в толще снега около лавинно-опасных склонов, особенно в условиях нормальных зим, на примере зимы 2018/19 г. (см. рис. 3).

Ранее отмечалось, что максимальная толщина снежного покрова приурочена к ландшафтам, расположенным на днищах долин [10]. Подобный аспект был подтверждён по результатам снегомерной съёмки 2020 г. (см. табл. 1). Увеличение толщины снежного покрова с высотой, характерное для горных территорий, на склонах Хибин выражено неявно. Небольшой высотный градиент снегонакопления, отмеченный на склонах, характеризуется увеличением толщины снежного покрова на 7,6 см на 100 м подъёма. Эта величина оказалась в 5–6 раз меньше, чем измеренная на ледниках Западного Шпицбергена в подобном диапазоне высот [20]. Высотные различия толщины снежного покрова на протяжённых склонах не превышают 0,7 м при толщине снежного покрова более 1,5 м. Более выражены высот-

ные различия в величине снеготпасов. С учётом средней плотности снежного покрова в лесу на равнине (0,28 г/см<sup>3</sup>) и плотности снега на плато (0,38 г/см<sup>3</sup>) различия достигают 400 мм в.э., т.е. на плато снеготпасы более чем вдвое превышают снеготпасы в лесной зоне на равнине.

На основе обработанных полевых данных, полученных в марте 2020 г., была составлена карта максимальных снеготпасов части Хибин в районе Кировска (рис. 4). Условия зимнего сезона 2019/20 г. характеризуются высокой снежностью — максимальной за последние 10 лет. Так, на ГМС Апатиты сумма осадков с ноября 2019 г. по апрель 2020 г. составила 349 мм [13] при средних значениях 242 мм в период с 2010 по 2020 г. Исходные данные для составления карты — средние значения толщины снежного покрова и плотности снежного покрова в шурфах, измеренные на высоте профилей и приведённые в табл. 1 и 2. Расчётные, средние по высоте снеготпасы на ландшафтных участках даны в табл. 3. На границах ландшафтных участков величину снеготпасов оценивали с учётом их высотного градиента, составившего 25 мм в.э. (7,6 см снега при его средней плотности 0,33 г/см<sup>3</sup>) на 100 м подъёма. Было сделано допущение, что среднее значение снеготпасов соответствует средней высоте участка. Далее был проведён расчёт снеготпасов на средних высотных уровнях в каждом типе ландшафтов с учётом измеренного высотного градиента снегонакопления.

Границы района, охватываемого картой, включали в себя все основные типы ландшафтов, характерные для южной части Хибин. Границы ландшафтных комплексов определяли при визуальном дешифрировании по спутниковому снимку *Pléiades-1A* от 26.07.2017 г. с использованием результатов анализа наклона поверхности (растровое изображение наклона поверхности, созданное на основе мозаики *ArcticDEM v3.0* с пространственным разрешением 10 м). К горным плато относили привершинные поверхности с наклоном менее 10°. Ниже плато горные постройки обрамляет пояс безлесных (верхних) склонов, ниже которых располагается пояс горных склонов, занятых лесной растительностью (нижних). Равнинные участки днищ долин, занятые преимущественно редколесьем, включали в себя территорию на дне горных долин с наклоном поверхности менее 10°. Береговые линии озёр и границы антропогенно преобразованных



**Рис. 4.** Карта максимальных снегозапасов окрестностей г. Кировск в Хибинах в 2020 г.:

1 – нет данных; 2 – изогипсы; 3 – реки; 4 – горные вершины

**Fig. 4.** Map of the maximum snow reserves in the vicinity of Kirovsk in the Khibiny in 2020:

1 – no data; 2 – isohypse; 3 – rivers; 4 – mountain peaks

ландшафтов определяли визуально по спутниковому снимку Pléiades-1A от 26.07.2017 г. Границы между градациями (см. легенду карты на рис. 4) в пределах ландшафтов одного типа проводили по

высотным уровням, расчётное значение снегозапаса на которых соответствовало граничному значению между разными градациями (500, 600 или 700 мм в.э.). Высотные уровни при этом определя-

Таблица 3. Снегозапасы в районе исследований в пределах различных ландшафтных комплексов в период максимального снегонакопления.

Ландшафтные участки (комплексы)	Общая площадь*, км <sup>2</sup>	Доля в исследуемой площади, %*	Средняя высота, м	Средний снегозапас, измеренный по профилям, мм в.э.	Расчётный снегозапас на средней высоте, мм в.э.
Нижние склоны	15,6±0,8	11,3	430	608±36	612±36
Верхние склоны	92,1±1,0	66,5	710	456±27	464±27
Плато	2,5±0,1	1,8	1070	665±38	714±39
Днища долин	23,6±0,9	17,0	370	710±41	707±41
Озёра	4,7±0,2	3,4	340	185±10	185±10

\*За вычетом техногенно-преобразованных ландшафтов.

ли по ЦМР. Так, на верхних безлесных склонах расчётный снегозапас 500 мм в.э. приурочен к высотам около 900 м. Расчётный снегозапас 700 мм в.э. на плато был приурочен к высотам около 1015 м.

При построении карты учитывалось, что пространственная изменчивость толщины и плотности снежного покрова в пределах каждого типа ландшафта была небольшой и в пересчёте на снегозапас оказалась существенно меньше установленных градаций величины снегозапасов на карте. Отметим, что расстояние от участков измерений до наиболее отдалённых от них участков карты (см. рис. 4) не превышает 9 км. Мы допускаем, что в масштабе выделенного района условия снегонакопления на участках с подобными типами ландшафта были близки как по толщине снежного покрова, так и по плотности. При небольшом высотном градиенте снегонакопления полученные границы распределения снежного покрова незначительно отличались от границ естественных ландшафтов. Наиболее протяжённая и изменчивая в пространстве граница на карте проведена между залесёнными нижними склонами (600–700 мм в.э.) и безлесными верхними склонами ниже 900 м (400–500 мм в.э.). Именно в нижних склонах мы отметили наибольшую пространственную изменчивость толщины снежного покрова. Другие границы ландшафтных комплексов – границы между залесёнными склонами и днищами долин (более 700 мм в.э.), границы горных плато между градациями «600–700 мм в.э.» и «более 700 мм в.э.» – были более однородны. Распределение снегозапасов по высоте имеет два максимума (см. рис. 4), поэтому границы «более 700 мм в.э.» отмечаются в двух случаях: на высоте 275 м в южной части крупной горной долины к югу и юго-западу от Кировска, и на высоте 1015 м. Границы между техногенно-преобразо-

ванными и природными ландшафтами определены инфраструктурой района.

Основной вклад в погрешность величины снегозапасов даёт ошибка в определении толщины снежного покрова радаром на исследуемом профиле, которая составляет 5% в соответствии с методикой, изложенной в работах [17, 21]. Инструментальная погрешность весового метода определения плотности снега – около 0,01 г/см<sup>3</sup>. Общая инструментальная погрешность оценки снегозапаса рассчитывалась как среднеквадратичное значение погрешностей радарных измерений и весового метода определения плотности снега. В итоге погрешность определения снегозапаса составила 5,5–6,0% в зависимости от ландшафтных условий. Средняя величина снегозапасов с учётом погрешности находится в пределах выбранных диапазонов их изменчивости в ландшафтных зонах, что позволяет в перспективе планировать более детальные исследования отдельных участков ландшафта Хибин.

Максимальные снегозапасы для техногенно-преобразованных ландшафтов (9,1% площади района исследований) не оценивались. Подобные оценки требуют отдельного исследования перераспределения снежного покрова в результате хозяйственной деятельности, что выходит за рамки задач данной работы.

Максимальные снегозапасы в границах береговых линий озёр оценивали на основе измерений на оз. Малый Вудьявр и на двух небольших озёрах в окрестностях г. Апатиты и пос. Кукисвумчорр. Полевые работы, выполненные в марте 2019 и 2020 гг., показали принципиальное отличие ситуации на ледяном покрове озёр от окружающих ландшафтов. На озёрном ледяном покрове толщина снежного покрова была более чем вдвое меньше, чем на берегах. Толщина снежного покрова составляла 35–40 см, нижние 5–10 см из которых

были обводнены. Отметим, что эти озёра расположены на разных высотах — 380, 335 и 180 м. Снежный покров на озёрах формируется после образования прочного ледяного покрова. При этом для озёр в районе исследований типичен прорыв воды из-под ледяного покрова в результате действия ветровой нагрузки снежного покрова.

На созданной нами карте видны основные закономерности распределения снегозапасов. Наибольшие величины максимальных снегозапасов (более 700 мм в.э.) характерны для пологих днищ долин и платообразных горных вершин. Меньшими величинами (600–700 мм в.э.) отличаются платообразные горные вершины ниже 1010–1020 м и нижние части горных склонов, покрытые лесом. Максимальные снегозапасы на безлесных горных склонах существенно меньше, но увеличиваются с высотой от 400–500 до 500–600 мм в.э. Наименьшие снегозапасы (менее 200 мм в.э.) характерны для поверхности ледяного покрова озёр, что связано с особенностями их ледового режима. Большую часть площади (66,5%) исследуемой территории Хибин (за вычетом техногенно-преобразованных ландшафтов) занимают безлесные горные склоны (см. табл. 3). Остальная территория преимущественно занята выположенными днищами долин (17,0%) и залесёнными нижними частями горных склонов (11,3%). Минимальная доля занимаемой площади характерна для платообразных горных вершин (1,8%) и озёр (3,4%).

Карта снегозапасов отражает особенности снегонакопления в зависимости от ландшафтных условий, изменения осадков с высотой и метеорологического перераспределения снега. Максимальное снегонакопление приурочено к пологим поверхностям днищ долин и плато, минимальное — к горным склонам без древесной растительности. Высотная дифференциация количества выпадающих твёрдых осадков играет здесь второстепенную роль и лучше выражена на протяжённых горных склонах с большим перепадом высот.

### Выводы

В марте 2020 г. были проведены снегомерные работы в Хибинских горах и в лесной зоне в окрестностях городов Кировска и Апатиты. Выполнена ландшафтная снегосъёмка в преде-

лах характерных элементов ландшафта Хибин: редколесье на днищах долин; нижних залесённых и верхних безлесных горных склонах; плато; смешанном лесу на равнинах предгорий. Работы выполнялись по профилям, проложенным на однородных участках местности, протяжённостью до 1,4 км. Использование георадара в условиях масштабных снегомерных работ показало значительные преимущества метода без потери точности измерений. Георадар «Пикор-Лёд» с частотой сигнала 1600 МГц позволяет определять толщину снежного покрова с точностью 1 см для плотного снега и 2 см для рыхлого. Таким образом, измерения георадаром по точности сравнимы с измерениями шупом. Большое число измерений толщины снежного покрова на профилях, производимые с помощью георадара, даёт возможность установить пространственную изменчивость этой величины и её статистические характеристики.

Ландшафтная снегосъёмка в условиях многоснежной зимы 2019/20 г. позволила обнаружить значительные пространственные различия в распределении снежного покрова, которые обусловлены главным образом пространственной и высотной сменой ландшафтных комплексов. Максимальные снегозапасы (свыше 700 мм в.э.) получены для редколесья на днищах долин и на горных плато, а минимальные (менее 400 мм в.э.) характерны для безлесных склонов гор и смешанного леса на равнинной территории. Высотные изменения снегозапасов выражены лишь на протяжённых горных склонах. По результатам измерений на горных склонах определён вертикальный градиент снегонакопления: 25 мм в.э. на 100 м.

По результатам обработки данных измерений построена карта максимальных снегозапасов участка Хибин (около 138 км<sup>2</sup>) в районе Кировска. На карте показано распределение снегозапасов в снежную зиму 2019/20 г., в основу которого положены данные полевых измерений и обработки космических снимков. По результатам исследования шурфов получены данные о строении снежной толщи на различных ландшафтных участках. Наиболее явные различия отмечены при сравнении результатов двух зим — 2018/19 и 2019/20 гг., которые были разными по условиям снегонакопления. Так, в обычную зиму 2018/19 г. снежная толща разви-

валась по типу разрыхления и более половины толщины снежного покрова находилось в стадии конструктивного метаморфизма. В снежную зиму 2019/20 г. снежная толща развивалась по типу уплотнения и её строение было относительно однородно.

**Благодарности.** Исследование пространственного распределения снежного покрова и обработка полученных данных проведены при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60067.

## Литература

1. *Войтковский К.Ф.* Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 126 с.
2. *Трошкина Е.С., Сапунов В.Н., Селиверстов Ю.Г., Черноус П.А.* Динамика снежного покрова в Хибинах (1936–2002 гг.) // МГИ. 2005. № 99. С. 112–115.
3. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Под ред. В.М. Котлякова. Т. 1. М: изд. РАН, 1997. 392 с.
4. *Глазовская Т.Г.* Возможное изменение снежности и лавинной активности вследствие прогнозируемого глобального потепления // МГИ. 2000. № 88. С. 70–73.
5. *Викулина М.А., Черноус П.А.* Прогнозирование лавиноопасных ситуаций с использованием ГИС-технологий. // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Докл. V науч.-практ. конф. М., 2006. С. 311–320.
6. *Заика Ю.В., Викулина М.А., Черноус П.А.* Многолетняя динамика нивальных процессов в Хибинах // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 69–74. doi: 10.15356/2076-6734-2012-1-69-74.
7. *Vignols R.M., Marshall G.J., Gareth W.R., Zaika Y., Phillips T., Blinova I.* Assessing snow cover changes in the Kola Peninsula, Arctic Russia, using a synthesis of MODIS snow products and station observations // The Cryosphere. Discuss. 2019. № 9. P. 1–33. doi: 10.5194/tc-2019-9.
8. *Китаев Л.М., Володичева Н.А., Олейников А.Д.* Многолетняя динамика снежности на северо-западе Русской равнины // МГИ. 2007. № 102. С. 65–72.
9. *Черноус П.А., Осокин Н.И., Чернов Р.А.* Пространственная изменчивость толщины снежного покрова на горном склоне (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 353–358. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-353-358.
10. *Сапунов В.Н., Сапунова Г.Г., Глазовская Т.Г., Селиверстов Ю.Г., Соловьев А.Ю.* Ландшафтная дифференциация в распределении снежного покрова в горах Субарктики (Хибинские горы) // МГИ. 2001. Вып. 91. С. 55–59.

Создание карты максимальных снегозапасов проведено в рамках темы Государственного задания № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5).

**Acknowledgments:** A study of the spatial distribution of snow cover and processing of the data obtained was supported by a grant Russian Foundation for Basic Research (RFBR) № 18-05-60067. Creating a map of the maximum snow reserves produced within the framework of the research project № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5).

## References

1. *Voitkovskiy K.F. Mekhanicheskie svoistva snega.* Mechanic properties of snow. Moscow: Nauka, 1977: 126 p. [In Russian].
2. *Troshkina E.S., Sapunov V.N., Seliverstov Yu.G., Chernous P.A.* Dynamics of snow cover in Khibiny Mts. (1936–2002). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2005, 99: 112–115. [In Russian].
3. World atlas of snow and ice resources. Ed. V.M. Kotlyakov. V. 1. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p.
4. *Glazovskaya T.G.* Possible change of snowiness and avalanche activity as a result of predicted global warming. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2000, 88: 70–73. [In Russian].
5. *Vikulina M.A., Chernous P.A.* Forecasting avalanche situations using GIS technologies. *Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsiy. Dokladyi V nauchno-prakticheskoi konferentsii.* Emergency forecasting problems. Reports of the V scientific and practical conference. Moscow, 2006: 311–320.
6. *Zaika Yu.V., Vikulina M.A., Chernous P.A.* Long-term dynamics of nival processes in the Khibiny Mountains. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2012, 1 (117): 69–74. doi: 10.15356/2076-6734-2012-1-69-74. [In Russian].
7. *Vignols R.M., Marshall G.J., Gareth W.R., Zaika Y., Phillips T., Blinova I.* Assessing snow cover changes in the Kola Peninsula, Arctic Russia, using a synthesis of MODIS snow products and station observations. *The Cryosphere.* Discuss. 2019, 9: 1–33. doi: 10.5194/tc-2019-9.
8. *Kitaev L.M., Volodicheva N.A., Oleynikov A.D.* Long-term dynamics of snowiness in northwestern part of Russian Plain. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2007, 102: 65–72. [In Russian].
9. *Chernous P.A., Osokin N.I., Chernov R.A.* Spatial variability of the snow depth on mountain slope in Svalbard. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2018, 58 (3): 353–358. doi:10.15356/2076-6734-2018-3-353-358. [In Russian].
10. *Sapunov V.N., Sapunova G.G., Glazovskaya T.G., Seliverstov Yu.G., Soloviev A.Yu.* Landscape differentiating

11. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Жируев С.П. Литолого-стратиграфические комплексы снежного покрова // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 1. С. 72–93. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93).
12. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
13. Электронный ресурс: rp5.ru
14. Электронный ресурс: <https://uwbs.ru/products/izmeritel-tolschiny-lda-picor-ice/>
15. Василевич И.И., Чернов Р.А. К оценке снегозапасов в русловых врезках методом георадиолокации на территории Арктического региона // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. № 64 (1). С. 5–15. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-5-15.
16. Котляков В.М., Мачерет Ю.Я., Сосновский А.В., Глазовский А.Ф. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56.
17. Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А., Черняков Г.А. Толщина снежного покрова на леднике Восточный Грэнфьорд (Шпицберген) по данным радарных измерений и стандартных снегомерных съёмок // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 5–20. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-5-20.
18. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The international classification for seasonal snow on the ground (UNESCO, IHP (International Hydrological Programme)-VII, Technical Documents in Hydrology, No 83; IACS (International Association of Cryospheric Sciences) contribution № 1). Paris: UNESCO/Division of Water Sciences, 2009: vi+67+18 p.
19. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. 2018, «ArcticDEM», Harvard Dataverse, V1. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>. Архив данных от 29.08.2018.
20. Вшивцева Т.В., Чернов Р.А. Пространственное распределение снежного покрова и поле температур в верхнем слое политермического ледника // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 373–380. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-373-380
21. Lapazaran J.J., Otero J., Martin-Espanol A., Navarro F.J. On the errors involved in ice-thickness estimates I: ground penetrating radar measurement errors // Journ. of Glaciology. 2016. V. 62. № 236. P. 1008–1020. doi: 10.1017/jog.2016.93
- of snow cover distribution in Khibiny mountains. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2001, 91: 55–59. [In Russian].
11. Kazakov N.A., Gensirovskiy J.V., Zhiruev S.P. Snow lithostratigraphic complexes. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2018, XXII (1): 72–93. doi: 10.21782/EC2541-9994-2018-1(63-81).
12. Macheret Yu.Ya. *Radiozondirovanie lednikov*. Radioecho sounding of glaciers. Moscow: Scientific World, 2006: 392 p. [In Russian].
13. <https://rp5.ru>.
14. <https://uwbs.ru/products/izmeritel-tolschiny-lda-picor-ice/>.
15. Vasilevich I.I., Chernov A.A. Estimation of snow reserves in watercourses in the Arctic Region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 5–15. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-5-15. [In Russian].
16. Kotlyakov V.M., Macheret Y.Y., Sosnovsky A.V., Glazovsky A.F. Speed of radio wave propagation in dry and wet snow. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56. [In Russian].
17. Lavrentiev I.I., Kutuzov S.S., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A., Cherniakov G.A. Snow thickness on Austre Gronfjordbreen, Svalbard, from radar measurements and standard snow surveys. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (1): 5–20. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-5-20. [In Russian].
18. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The international classification for seasonal snow on the ground (UNESCO, IHP (International Hydrological Programme)-VII, Technical Documents in Hydrology, No 83; IACS (International Association of Cryospheric Sciences) contribution No 1). Paris: UNESCO/Division of Water Sciences, 2009: vi+67+18 p.
19. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. 2018, «ArcticDEM», Harvard Dataverse. V.1. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>. Archive of data from 29.08.2018.
20. Vshivtseva T.V., Chernov R.A. Spatial distribution of snow cover and temperature in the upper layer of a polythermal glacier. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 373–380. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-373-380. [In Russian].
21. Lapazaran J.J., Otero J., Martin-Espanol A., Navarro F.J. On the errors involved in ice-thickness estimates I: groundpenetrating radar measurement errors. *Journ. of Glaciology*. 2016, 62 (236): 1008–1020. doi: 10.1017/jog.2016.93.