

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

© 2025 г. С. В. Калиничева*, А. Н. Петрова, В. П. Семенов

Институт мерзлотоведения СО РАН, Якутск, Россия

**e-mail: ikoveta@rambler.ru*

Поступила в редакцию 07.05.2025 г.

После доработки 06.06.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

Приводится методика картирования высоты снежного покрова на пяти участках Западной Якутии с применением полевых данных и автоматизированного дешифрирования высоты снежного покрова по методу неконтролируемой классификации. Установлено, что метод неконтролируемой классификации грамотно распределяет снежный покров по высоте и может применяться при составлении карт снежного покрова на обширных территориях.

Ключевые слова: высота снежного покрова, ГИС, дешифрирование, дистанционное зондирование Земли, неконтролируемая классификация, снегомерная съёмка

DOI: 10.7868/S2412376525030047

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров – один из основных факторов формирования температурного режима горных пород и индикатор наличия или отсутствия многолетнемёрзлых пород (далее – ММП). В условиях резко континентального климата снег, обладая высокими теплоизоляционными свойствами, является одним из наиболее действенных факторов, предохраняющих горные породы от охлаждения в зимний период, что приводит к повышению их среднегодовой температуры. В целом утепляющий эффект снежного покрова растёт с повышением его толщины и уменьшением плотности. Влияние снежного покрова на глубину сезонного промерзания и температуру горных пород рассмотрено в работах В.А. Кудрявцева (1954), Б.В. Проскуряковой (1956), Г.В. Порхаева (1970), Г.М. Фельдмана (1977), А.В. Павлова (1975, 1979), Н.И. Шендера (1986) и др.

Ввиду вышесказанного при мерзлотных исследованиях важно учитывать параметры снежного покрова. Для этих целей ведутся режимные снегомерные съёмки, в ходе которых по маршруту на контрольных точках проводятся замеры высоты, плотности и других параметров

снежного покрова. Однако на обширных территориях возникают трудности при определении пространственного распределения высоты снежного покрова. Один из важных инструментов в решении данной проблемы – методы дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ). Преимущества этих методов обуславливаются большим пространственным охватом, повторяемостью съёмки и современными методами их обработки.

Известны разные методы определения высоты снежного покрова с применением ДЗЗ. Например, для оценки высоты снежного покрова применяется нормализованный разностный индекс снега (NDSI) (Toleubay et al., 2021), метод комплексной дальнометрии, реализуемый с помощью средств радиолокационного и лазерного зондирования с борта вертолёта (Шошин, 2021), многоспектральные спутниковые снимки (Елисеев, Симакина, 2024), модель обратного рассеивания для оценки глубины снежного покрова по данным Sentinel-1 (Lievens et al., 2019), метод сравнения цифровых карт поверхности, построенных в летние и зимние месяцы с использованием спутниковых снимков высокого разрешения (Eberhard et al., 2021), с использованием

беспилотных летательных аппаратов или самолётов (Bühler et al., 2016; Adams et al., 2018; Eker et al., 2019), наземных камер (Eberhard et al., 2021), а также наземного или воздушного лазерного сканирования (Eker et al., 2019; Jacobs et al., 2021) и другие.

Как видно из перечисленного выше, исследователи применяют разные методы оценки высоты снежного покрова. В работе для определения толщины снежного покрова использовался метод неконтролируемой классификации (классификация без обучения).

Задача настоящего исследования – выявление пространственного распределения снежного покрова (дифференциация по высоте) в районе Западной Якутии с применением автоматизированного дешифрирования (метода неконтролируемой классификации) космоснимка (полученного в период разрушения снежного покрова) и результатов снегомерных съёмов.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Исследование снежного покрова выполнялось в районе Западной Якутии, где рассмотрено пространственное распределение высоты снежного покрова на пяти участках – Муна, Удачный, Айхал, Накын и Мирный. Согласно классификации физико-географического районирования (Физико-географическое ..., 1968), участок исследования вокруг г. Удачного и пос. Айхал относится к Оленекско-Мархинской провинции Средней Сибири, к подзоне северной лиственничной тайги с напочвенным покровом из багульника, голубики, брусники, таёжных трав и зелёных мхов. Верхняя Муна находится в одноимённой провинции, в подзоне северной лиственничной тайги. Участок вокруг г. Мирного относится к Вилуйско-Тунгусской провинции, где растительность представлена лиственничными лесами с небольшой примесью угнетённой ели. Участок Накын расположен в Вилуйской провинции Средней Сибири, на пологоволнистой денудационной равнине, расчленённой начинающимися здесь долинами левых притоков Лены и правых – Вилюя.

Климат исследуемой территории резкоконтинентальный, с большими годовыми амплитудами температур, жарким засушливым летом,

короткими межсезоньями и суровой продолжительной зимой. Зима с продолжительным залеганием снежного покрова, но малоснежная. При этом имеется довольно значительная пространственная неоднородность характеристик снежного покрова. В базе данных мониторинга состояния снежного покрова ВНИИГМИ-МЦД территория России разделена на девять квазиоднородных климатических регионов, выбор которых был осуществлён на основании классификации Алисова. Согласно этому подходу, исследуемая территория относится к двум разным квазиоднородным районам: северная часть (участки Удачный, Айхал, Верхняя Муна и Накын) относится к северной части Восточной Сибири и Якутии, а участок Мирный – к центральному и южному регионам Восточной Сибири (Булыгина и др., 2017). Для удобства обозначим их как южная часть и северная часть исследуемой территории. Климат северной части более суровый: средняя температура января $-38...-39^{\circ}\text{C}$, в отдельные годы $-47...-50^{\circ}\text{C}$; за зиму выпадает 100–140 мм осадков. В южной части исследуемой территории зимы менее суровые и более снежные: средняя температура января $-30...-35^{\circ}\text{C}$, сумма осадков холодного периода составляет в среднем 110–130 мм.

На характеристики снежного покрова влияют в первую очередь географические особенности территории, а также климатические условия отдельных лет – характер атмосферной циркуляции в период установления снежного покрова и дальнейшего снегонакопления. Сроки образования снежного покрова, как и даты выпадения первого снега, из года в год сильно колеблются; устойчивый снежный покров устанавливается в среднем только через 8–15 дней после выпадения первого снега, в северной части территории в конце сентября, в южной части в первой половине октября. В течение зимы высота снежного покрова постепенно увеличивается с различной интенсивностью; интенсивный рост высоты снежного покрова происходит в начале зимы, в период с наибольшей повторяемостью циклонической погоды. С середины ноября до середины февраля, при преобладании антициклонального типа погоды, количество осадков невелико. Со второй половины февраля количество осадков увеличивается, в этот период снегонакопление происходит более интенсивно, и в конце марта – начале апреля снежный покров достигает своей максимальной величины. Даты разрушения устойчивого снежного покрова и полного схода снега из года в год также сильно варьируют

в зависимости от особенностей атмосферной циркуляции. Снежный покров может сохраняться до конца апреля – начала мая в южной части территории и до середины, а в отдельные годы до конца мая на севере. Число дней со снежным покровом на исследуемой территории колеблется от 200–210 на юге до 230 дней на севере.

Пространственное распределение снежного покрова зависит от локальных условий – защищённости, особенностей рельефа, характера подстилающей поверхности, наличия под снегом травы, кустарников, кочек и т.п. Чем больше высота снежного покрова, тем больше выражена её разница на защищённых и открытых местах, составляя в среднем 5–15 см. В северной части средняя высота снега составляет 45–55 см, максимальная достигает 60–65 см; в южной части, соответственно, – 50–55 и 65–70 см. На открытых пространствах и возвышенностях снег редко превышает 30–40 см из-за ветрового сдувания. В лесных массивах и долинах рек (бассейн р. Виллой) высота снега местами может достигать 70–90 см (Научно-прикладной справочник «Климат России»..., 2025).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Снегомерная съёмка. Полевые снегомерные съёмки в районе исследования выполнялись в марте–апреле 2024 г. в 52 точках. Согласно полевым исследованиям, выполненным сотрудниками Института мерзлотоведения в районе исследования, высота снежного покрова в марте составила от 28 до 70 см, а его плотность – от 0.12 до 0.21 г/см³.

Максимальная высота снежного покрова наблюдалась на участке Мирный (70 см). Высота и плотность снежного покрова на одном и том же участке значительно варьируют в зависимости от рельефа, характера поверхности и растительного покрова.

Выбор репрезентативного снимка. Для оценки пространственного распределения снежного покрова в районе исследования применён метод ДЗЗ. Важный этап при экстраполяции полевых данных посредством космоснимков – выбор репрезентативных снимков без облачности, с учётом даты, близкой непосредственно к полевым снегомерным съёмкам. Важность выбора космоснимков без облачности обусловлена ещё несовершенством метода неконтролируемой классификации, который не позволяет

устранять искажения, обусловленные наличием облачности.

В качестве исходных снимков для выявления различий распределения высоты снега на рассматриваемых участках взяты снимки Landsat-8/OLI, максимально близкие к датам полевых снегомерных съёмок: по участку Удачный – снимок за 27.03.2024 (снегомерная съёмка проводилась 30.03.2024); по участку Накын – снимок за 01.04.2024 (снегомерные съёмки проводились 3–4.04.2024); по участку Муна – снимок за 27.03.2024 (снегомерная съёмка проводилась 29.03.2024); по участку Айхал – снимок за 20.03.2024 (снегомерная съёмка проводилась 31.03.2024); по участку Мирный – снимок за 31.03.2024 (снегомерная съёмка проводилась 3–4.04.2024).

Автоматизированное дешифрирование высоты снежного покрова по мультиспектральному снимку. Для создания карты высоты снежного покрова рассматриваемых участков Муна, Удачный, Айхал, Накын и Мирный на первом этапе мы выполняли анализ пространственной дифференциации снежного покрова по комбинации каналов 5–4–3 Landsat-8/OLI (рис. 1). Комбинация каналов производилась в программе ArcGIS 10.1.

Комбинация каналов 5–4–3 Landsat-8/OLI – это стандартная комбинация “искусственные цвета”. Растительность в этой комбинации отображается красным, а снег – белым (GISLAB..., 2025). Данная комбинация наиболее удачна для анализа параметров снежного покрова.

Для интерпретации высоты снежного покрова данный мультиспектральный снимок разделялся на классы по методу неконтролируемой классификации в программе ArcGIS 10.1 (ESRI..., 2025) (рис. 2). Метод неконтролируемой классификации (классификация без обучения) относится к методам автоматизированного дешифрирования многозональных снимков. Данный метод позволяет автоматически разделять пиксели на группы (кластеры), сходные по спектральным характеристикам (спектральной яркости). Выявление различий спектральных характеристик снежного покрова по стадиям оттаивания позволило применить данный метод при их дешифрировании.

По полученным классам производилась интерпретация высот снежного покрова наряду с анализом полевых данных.

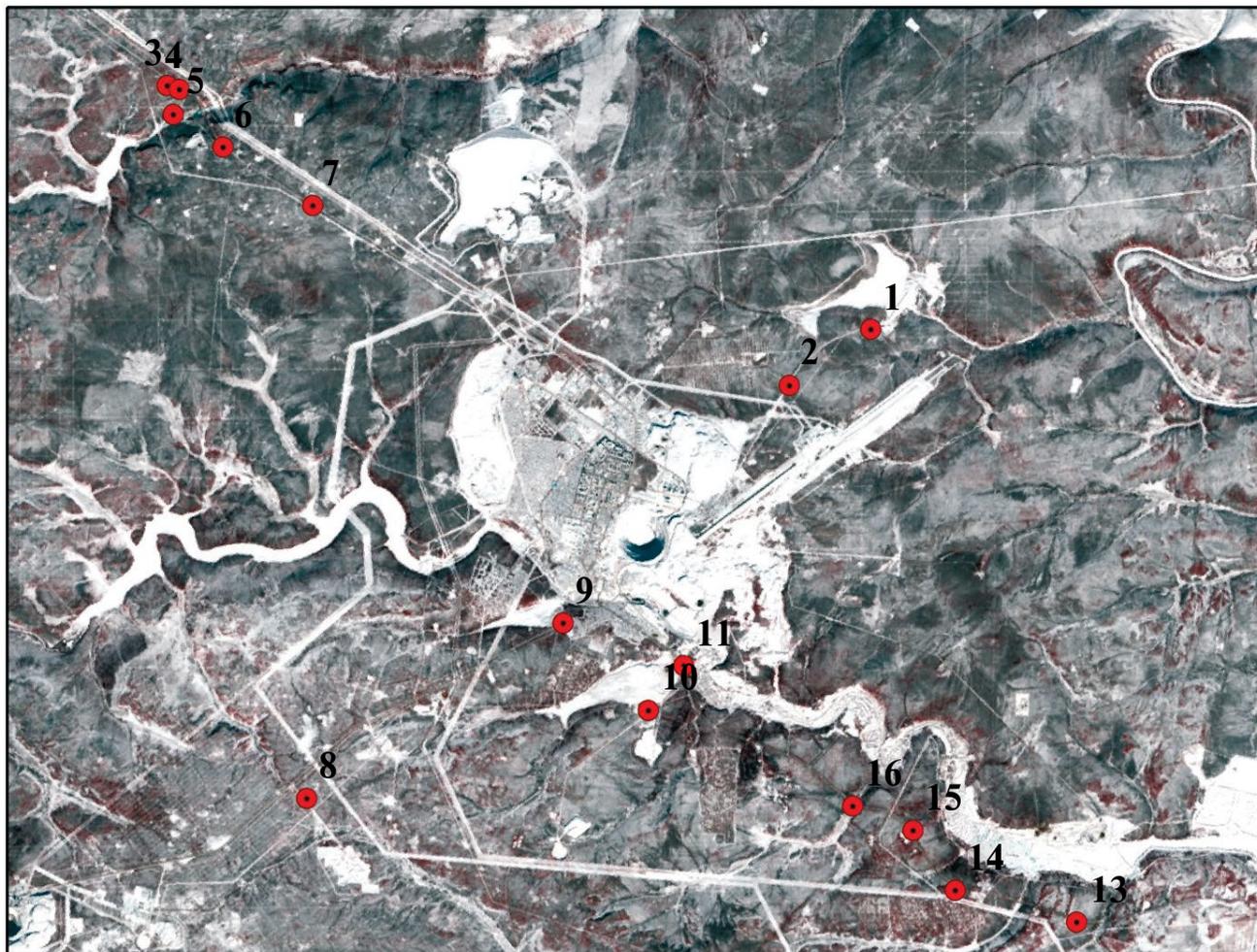


Рис. 1. Исходный мультиспектральный снимок (комбинация каналов 5–4–3) Landsat-8/OLI для интерпретации высоты снежного покрова (на примере участка Мирный)

Fig. 1. Original multispectral image (combination of 5–4–3 bands) Landsat-8/OLI for interpretation of snow cover thickness (using the Mirny site as an example)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чем выше снежный покров, тем больше запасы воды в нём, и, соответственно, требуется больше количества тепла на фазовые переходы. Принцип исследования высоты снежного покрова методом неконтролируемой классификации основывается непосредственно на данной зависимости. Так, участки с устойчивым мощным снежным покровом характеризуются наибольшей отражательной способностью (самой высокой спектральной яркостью ввиду большого альбедо), на шкале (см. рис. 2) они представлены самыми высокими значениями (ближе к 10). Соответственно, чем меньше высота снежного покрова, тем ниже класс. Объясняется это тем, что из-за насыщения снега водой при оттаивании отражение ближнего и среднего

инфракрасного излучений падает (Методы дистанционного..., 2005). Согласно данному принципу, с самой низкой спектральной яркостью (на шкале ближе к единице) представлены участки без снега либо с минимальными значениями снежного покрова.

По полученным классам производилась интерпретация высот снежного покрова. Для этого данные снегомерных съёмок каждого отдельного участка наносились на полученную классификацию с присвоением каждому классу значения высоты снежного покрова в см и последующей экстраполяцией их на всю территорию с укрупнением до четырёх градаций.

Создание карты высоты снежного покрова. По результатам приведённой выше интерпретации полученных классов автоматизированного

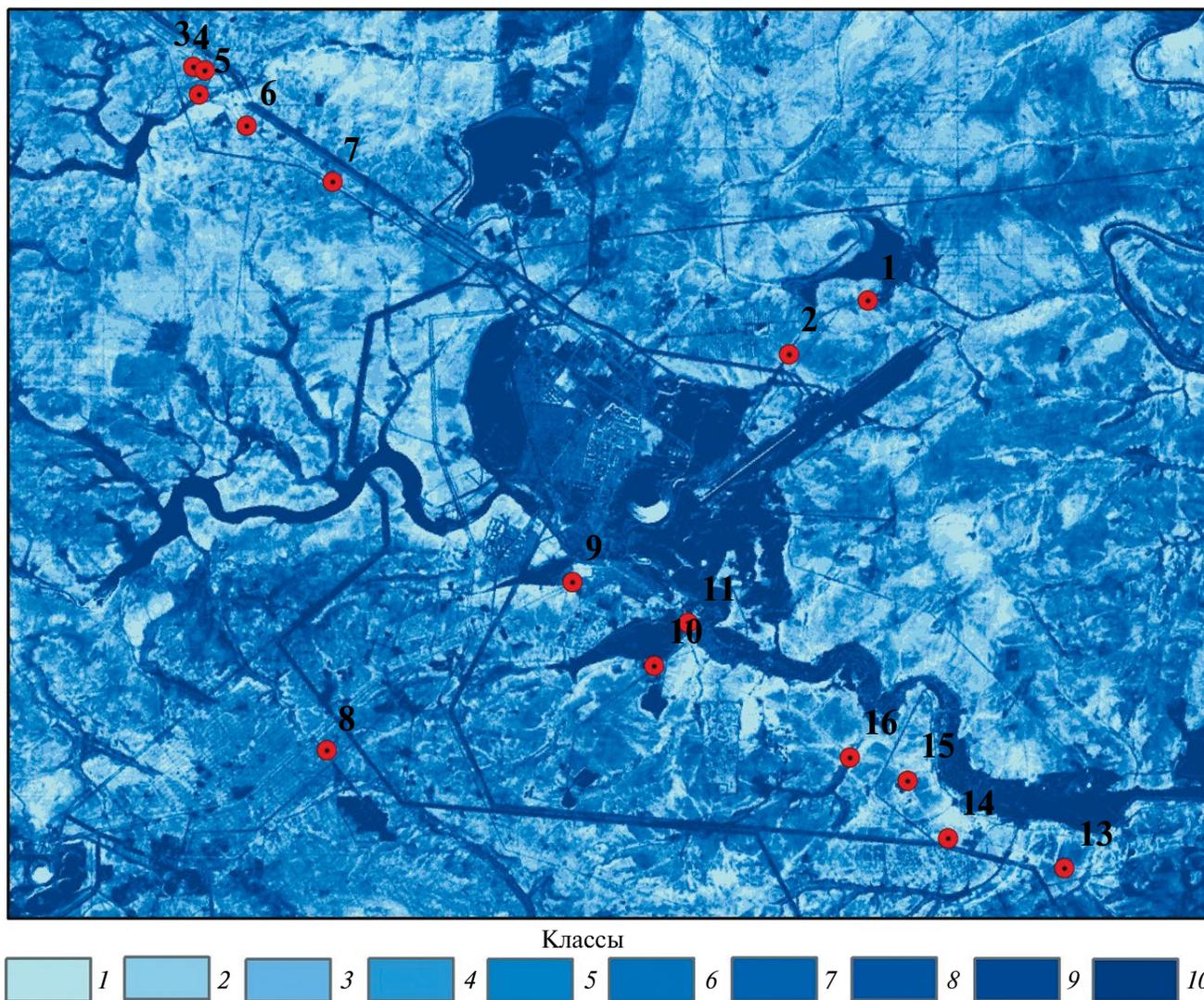


Рис. 2. Дифференциация высоты снежного покрова по методу неконтролируемой классификации (на примере участка Мирный)

Fig. 2. Differentiation of snow cover depth using the unsupervised classification method (using the Mirny site as an example)

дешифрирования спутникового мультиспектрального снимка Landsat-8/OLI с данными полевых снегомерных измерений составлена карта высоты снежного покрова участков Муна, Удачный, Айхал, Накын и Мирный (рис. 3).

Участки Муна, Удачный, Айхал и Накын относятся к северной части исследуемой территории, с более низкими зимними температурами, меньшим количеством осадков и, как следствие, меньшей высотой снежного покрова. Из-за схожести ландшафтных условий эти четыре участка имеют более-менее схожую картину дифференциации снежного покрова. Цветовые градации на этих четырёх участках составлены согласно

среднему значению высоты снежного покрова по данным снегомерных съёмок и представлены следующим образом: снежный покров, имеющий среднюю высоту ≤ 40 см, на картах даётся самым светлым оттенком голубого цвета. Соответственно, более насыщенными оттенками от самого светлого голубого до синего цвета по очерёдности показаны участки со средней высотой снежного покрова 41–44, 45–50, 51–53 и 54–59 см.

Климат южной части территории (участок Мирный) имеет ряд отличий: морозы здесь не так суровы и продолжительны, как на севере; количество атмосферных осадков выше, что

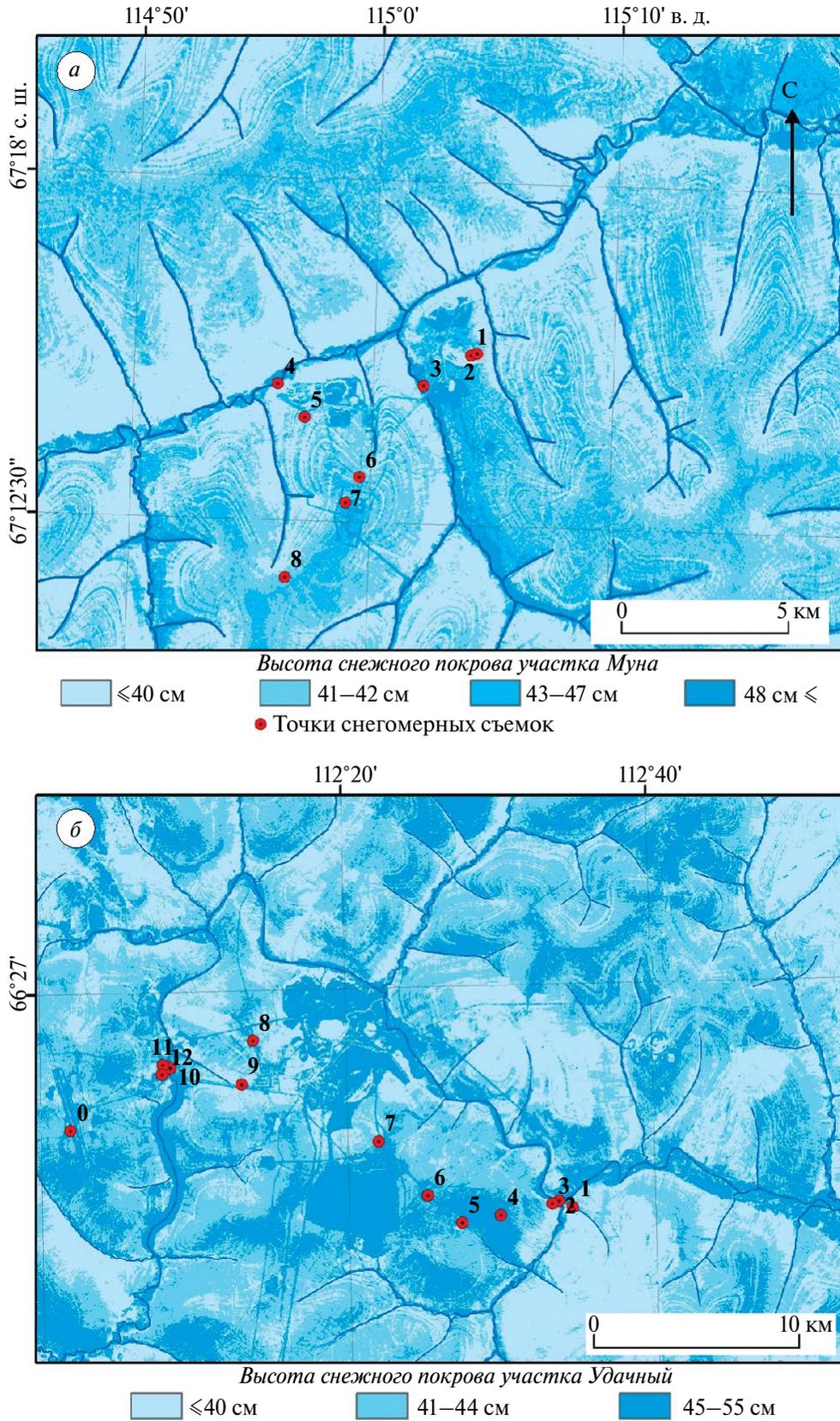


Рис. 3. Карты высоты снежного покрова на участках: Муна (а), Удачный (б), Айхал (в), Накын (г), Мирный (д)
 Fig. 3. Snow cover depth maps of areas: Muna (a); Udachny (b); Aikhal (v); Nakyn (g); Mirny (d)

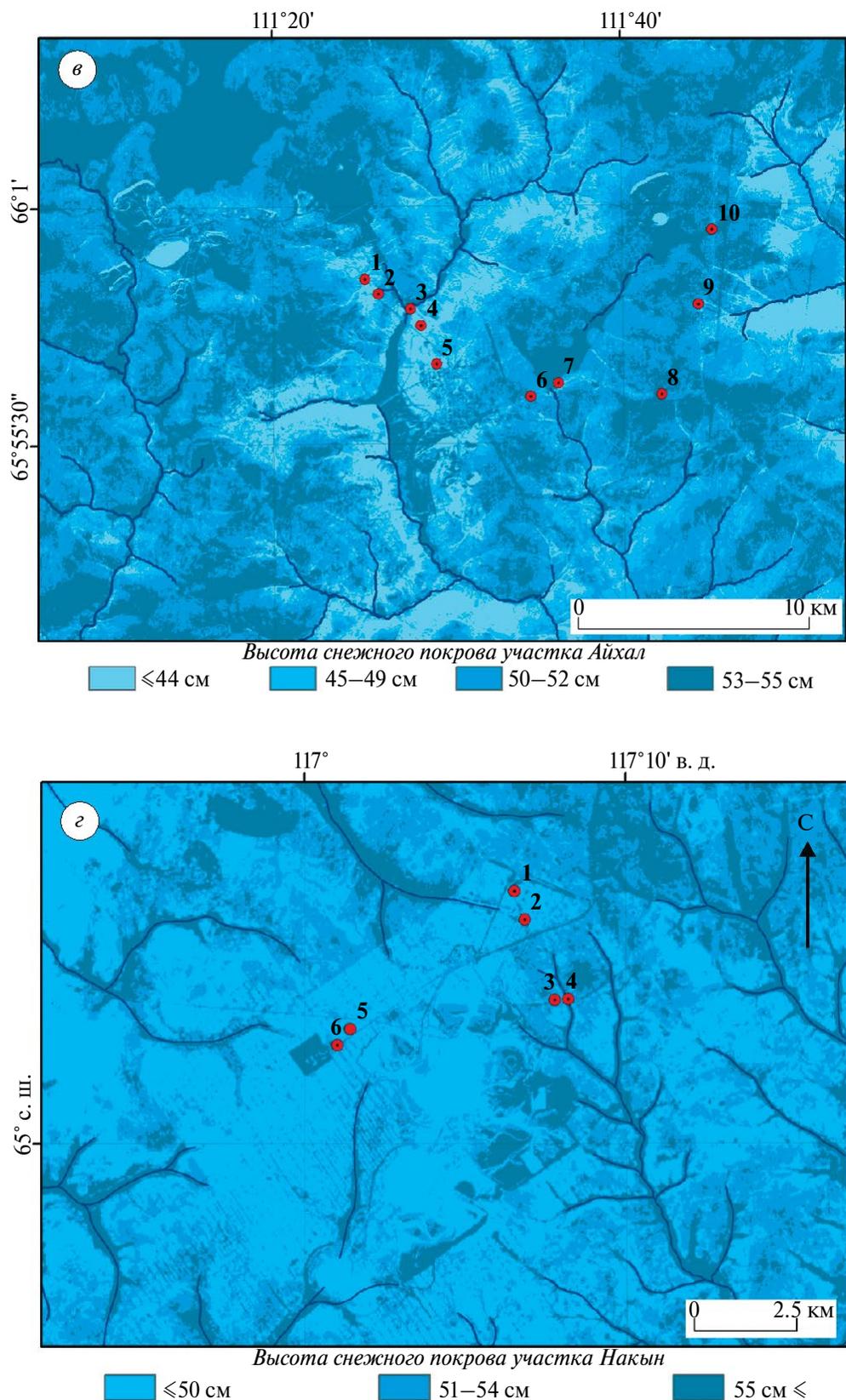


Рис. 3. Продолжение
Fig. 3. Continued

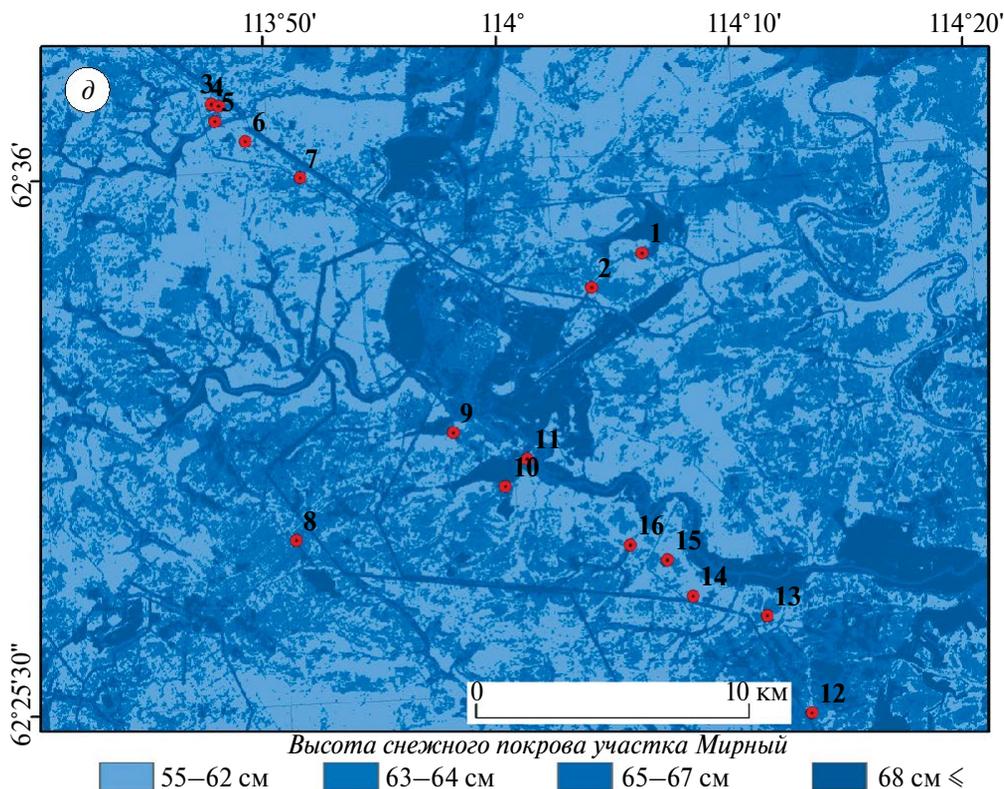


Рис. 3. Продолжение
Fig. 3. Continued

определяет особенности снежного покрова. Градации высоты снежного покрова начинаются от 55 см, максимальная составляет 68 см и выше. Самый маломощный снежный покров отмечается в лесных массивах, расположенных к северо-западу и северу от г. Мирного, наиболее мощный – в долинах рек Ирелях, Чуоналыр, на других водных объектах и на техногенных ландшафтах вокруг города.

Как видно по картам снежного покрова (см. рис. 3, а–д), наименьшие высоты снежного покрова (≤ 40 см – Муна, Удачный; ≤ 44 см – Айхал; ≤ 50 см – Накын; 55–62 – Мирный) характерны для участков на нижних частях склонов, а также на склонах наветренных западных и северо-западных экспозиций. Средняя толщина снежного покрова (41–47 см – Муна, Удачный; 45–52 см – Айхал; 51–54 см – Накын; 63–67 см – Мирный) имеет место на средних и нижних частях склонов подветренных и реже наветренных экспозиций. Наибольшие высоты снежного покрова (48 см – Муна, Удачный; 53–55 см – Айхал; 55 см – Накын; 68 см – Мирный) формируются на приводораздельных и верхних частях склонов подветренных экспозиций, что

объясняется большим количеством снега и повышенной турбулентностью воздушных масс на верхних частях водоразделов. Кроме того, наибольшая высота снега характерна и для долин рек, впадин, а также техногенных ландшафтов и селитебных территорий. На формирование снежного покрова на последних влияет комплекс факторов, которые могут исказить результаты. В рамках данной работы более подробно эти моменты не рассматриваются. Ввиду этого авторами рекомендуется применять приведённую методику в исследовании природных ландшафтов.

ВЫВОДЫ

Приведённые выше этапы работы с использованием комбинации каналов Landsat-8/OLI, метода неконтролируемой классификации, корреляции полевых данных позволяют грамотно дифференцировать высоты снежного покрова при ДЗЗ, что важно для мерзлотных исследований.

Сопоставление результатов автоматизированного дешифрирования (неконтролируемой классификации) с полевыми снегомерными измерениями подтвердило применимость данного

метода при дифференциации высоты снежного покрова. Выявленные количественные критерии разделения снежного покрова по высоте с учётом разных дат его схода, фиксирующегося на весенних космоснимках, показали возможность учёта этого фактора при геокриологическом картировании.

Описанный в статье метод неконтролируемой классификации при отсутствии полевых измерений высоты снежного покрова может быть применён исследователями при визуальном анализе пространственного распределения высоты снежного покрова. Наличие полевых измерений при таком анализе добавит точности, отображая распределение высоты снега в цифрах. Несомненно, в представленном методе имеются погрешности, на наш взгляд, объясняемые недостаточно высоким разрешением снимков, а также локальными условиями.

Отображённый в данном исследовании метод — это один из способов оценки распределения снежного покрова при ДЗЗ и может быть усовершенствован в будущем.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта “Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири” (рег. № 122011400152-7).

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the project “Cryogenic processes and formation of natural risks of development of permafrost landscapes of Eastern Siberia” (reg. No. 122011400152-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н.* Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 87–96.
- Елисеев А.В., Симакина Т.Е.* Определение высоты снежного покрова по многоспектральным спутниковым снимкам // Материалы 22-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (Москва, 11–15 ноября 2024 г.). М.: Ин-т космических исследований РАН, 2024. С. 256. <https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a>
- Кудрявцев В.А.* Температура вечномерзлой толщи в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 182 с.
- Методы дистанционного исследования земной поверхности: учебно-методическое пособие /
- П.Н. Дагуров, Т.Н. Чимитдоржиев. Улан-Удэ: Изд-во ФГОУ ВПО, 2005. 88 с.
- Научно-прикладной справочник «Климат России» // Электронный ресурс. URL: <http://aisori.meteo.ru/CIspr> (Дата обращения 01.06.2025)
- Павлов А.В.* Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Якутское книжное изд-во, 1975. 301 с.
- Павлов А.В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 237 с.
- Порхаев Г.В.* Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М.: Наука, 1970. 208 с.
- Проскурякова Б.В.* Указания по подготовке грунта к разработке в зимних условиях. М.: Бюро технич. помощи ин-та Госсельстрой, 1956. 190 с.
- Фельдман Г.М.* Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск: Наука, 1977. 191 с.
- Физико-географическое районирование СССР / Под ред. Н.А. Гвоздецкого. М.: Изд-во МГУ, 1968. 576 с.
- Шендер Н.И.* Рекомендации по прогнозу температурного режима грунтов. Якутск: Ин-т мерзлотоведения Сибирского отделения АН СССР, 1986. 57 с.
- Шошин Е.Л.* Методы дистанционного измерения характеристик снежных покровов // Вестник кибернетики. 2021. № 1 (41). С. 20–30. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2021-1-20-30>
- Adams M.S., Bühler Y., Fromm R.* Multitemporal accuracy and precision assessment of unmanned aerial system photogrammetry for slope-scale snow depth maps in alpine terrain // Pure Appl. Geophys. 2018. V. 175 (9). P. 3303–3324. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1748-y>
- Bühler Y., Adams M.S., Bösch R., Stoffel A.* Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UAS): potential and limitations // The Cryosphere. 2016. V. 10 (3). P. 1075–1088. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1075-2016>
- Eberhard L.A., Sirguey P., Miller A., Marty M., Schindler K., Stoffel A., Bühler Y.* Intercomparison of photogrammetric platforms for spatially continuous snow depth mapping // The Cryosphere. 2021. V. 15 P. 69–94. <https://doi.org/10.5194/tc-15-69-2021>
- ESRI. Resources for ArcMap and migration support // Электронный ресурс. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (Дата обращения: 07.05.2025).
- GISLAB. Географические информационные системы и дистанционное зондирование // Электронный ресурс. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-band-comb.html> (Дата обращения: 07.05.2025).
- Jacobs J.M., Hunsaker A.G., Sullivan F.B., Palase M., Burakowski E.A., Herrick C., Cho E.* Snow depth mapping with unpiloted aerial system lidar observations: a case study in Durham, New Hampshire, United States //

- The Cryosphere. 2021. V. 15. P. 1485–1500.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-1485-2021>
- Lievens H., Demuzere M., Marshall H.P. Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space // Nat. Commun. 2019. V. 10. 4629.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12566-y>
- Toleubay Zh.B., Usalinov E.B., Shmatov B.B. Model for calculating snow cover characteristics based on remote sensing data // Science Bulletin of the Kazakh Agro Technical University named after S. Seifullin. 2021. V. 4. № 111. P. 44–49.
[https://doi.org/10.51452/kazatu.2021.4\(111\).782](https://doi.org/10.51452/kazatu.2021.4(111).782)

Citation: Kalinicheva S.V., Petrova A.N., Semenov V.P. Automated interpretation of multi-zone space images for snow depth recognition: the case of Western Yakutia. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (3): 411–421. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030047

Automated Interpretation of Multi-Zone Space Images for Snow Depth Recognition: the Case of Western Yakutia

© 2025 S. V. Kalinicheva[#], A. N. Petrova, V. P. Semenov

Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

[#]*e-mail: ikoveta@rambler.ru*

Received May 7, 2025; Revised June 6, 2025; Accepted June 26, 2025

The article presents a methodology for mapping the depth of snow cover in 5 areas of Western Yakutia using field data and automated interpretation of the depth of snow cover using the unsupervised classification method (classification without training) of a multi-spectral space image obtained in the spring in the area under consideration. Field snow surveys in the study area were carried out in March–April 2024 at 52 points. The depth of snow cover in March ranged from 28 to 70 cm, and its density from 0.12 to 0.21 g/cm³. Landsat-8 / OLI images closest to the dates of field snow surveys were used as initial images to identify differences in the distribution of snow depth in the areas under consideration. We created a map of the depth of snow cover for the areas under consideration Muna, Udachny, Aikhal, Nakyn and Mirny in two stages. The first stage included an analysis of the spatial differentiation of snow cover using a combination of 5–4–3 Landsat-8/OLI bands. Then, to interpret the depth of snow cover, this multispectral image was divided into classes using the unsupervised classification method in the ArcGIS 10.1 program, and the resulting classes were compared with field research materials. According to the results of the conducted study of snow depth mapping, it was revealed that the lowest snow depths are typical for the lower parts of the slopes, as well as for the slopes of windward western and northwestern exposures. The average thickness of the snow cover occurs in the middle and lower parts of the slopes of leeward and, less often, windward exposures. The greatest snow depths are formed on the watershed and upper parts of the slopes of leeward exposures, which is explained by the large amount of snow and increased turbulence of air masses in the upper parts of the watersheds. In addition, the greatest snow thickness is typical and for river valleys, in depressions, as well as on man-made landscapes and residential areas. Comparison of the results of automated decoding (uncontrolled classification) with field snow measurements confirmed the applicability of this method in differentiating the depth of snow cover.

Keywords: GIS, interpretation, remote sensing, snow cover depth, snow survey, unsupervised classification

REFERENCES

- Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Monitoring of snow cover on the territory of the Russian Federation. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii*. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. 2017, 366: 87–96 [In Russian].
- Eliseev A.V., Simakina T.E. Determining the height of snow cover from multispectral satellite images. *Materialy 22-j Mezhdunarodnoj konferencii "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*

- (Moskva, 11–15 noyabrya 2024 goda). Proceedings of the 22nd International Conference “Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2024: 245 p.
<https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a> [In Russian].
- Kudryavtsev V.A. Temperatura vechnomerzloy tolshchi v predele SSSR.* The temperature of the permafrost layer within the USSR. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1954: 182 p. [In Russian].
- Metody distancionnogo issledovaniya zemnoj poverhnosti: uchebno-metodicheskoe posobie.* Methods of remote exploration of the Earth’s surface: an educational and methodological guide. Ulan-Ude: Izd-vo FGOU VPO, 2005: 88 p. [In Russian].
- Scientific and Applied Handbook “Climate of Russia”: official site. Retrieved from: URL: <http://aisori.meteo.ru/ClspR> (Last access: June 1, 2025). [In Russian].
- Pavlov A.V. Teploobmen pochvy s atmosferoj v severnyh i umerennyh shirotah territorii SSSR.* Heat exchange of soil with atmosphere in the northern and temperate latitudes of the USSR territory. Yakutsk: Yakutsk book publishing house, 1975: 301 p. [In Russian].
- Pavlov A.V. Teplofizika landshaftov.* Thermal physics of landscapes. Novosibirsk: Nauka, 1979: 237 p. [In Russian].
- Porkhaev G.V. Teplovoe vzaimodejstvie zdaniy i sooruzhenij s vechnomerzlymi gruntami.* Thermal interaction of buildings and structures with permafrost soils. Moscow: Nauka, 1970: 208 p. [In Russian].
- Proskuryakova B.V. Ukazaniya po podgotovke grunta k rabotke v zimnih usloviyah.* Guidelines for preparing soil for development in winter conditions. Moscow: Bureau of technical assistance of the Gosselstroy Institute, 1956: 190 p. [In Russian].
- Feldman G.M. Prognoz temperaturnogo rezhima gruntov i razvitiya kriogennyh processov.* Forecast of the temperature regime of soils and the development of cryogenic processes. Novosibirsk: Nauka, 1977: 191 p. [In Russian].
- Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie SSSR.* Physical-geographical zoning of the USSR edited by. Moscow: Moscow University Press, 1968: 576 p. [In Russian].
- Shender N.I. Rekomendacii po prognozu temperaturnogo rezhima gruntov.* Recommendations for forecasting soil temperature regime. Yakutsk: P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS 1986: 57 p. [In Russian].
- Shoshin E.L.* Methods of remote measurement of snow cover characteristics. *Vestnik kibernetiki.* Proceedings in Cybernetics. 2021, 1 (41): 20–30.
<https://doi.org/10.34822/1999-7604-2021-1-20-30> [In Russian].
- Adams M.S., Bühler Y., Fromm R.* Multitemporal accuracy and precision assessment of unmanned aerial system photogrammetry for slope-scale snow depth maps in alpine terrain. *Pure Application Geophysics.* 2018, 175 (9): 3303–3324.
<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1748-y>
- Bühler Y., Adams M.S., Bösch R., Stoffel A.* Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): potential and limitations. *The Cryosphere.* 2016, 10 (3): 1075–1088.
<https://doi.org/10.5194/tc-10-1075-2016>
- Eberhard L.A., Sirguey P., Miller A., Marty M., Schindler K., Stoffel A., Bühler Y.* Intercomparison of photogrammetric platforms for spatially continuous snow depth mapping. *The Cryosphere.* 2021, 15: 69–94.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-69-2021>
- Resources for ArcMap and migration support: Electronic data. Retrieved from: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (Last access: May 7, 2025).
- GISLAB. Geographic Information Systems and Remote Sensing: Electronic data. Retrieved from: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (Last access: May 7, 2025).
- Jacobs J.M., Hunsaker A.G., Sullivan F.B., Palace M., Burakowski E.A., Herrick C., Cho E.* Snow depth mapping with unpiloted aerial system lidar observations: a case study in Durham, New Hampshire, United States. *The Cryosphere.* 2021, 15: 1485–1500.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-1485-2021>
- Lievens H., Demuzere M., Marshall HP.* Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. *Nat. Commun.* 2019, 10: 4629.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12566-y>
- Toleubay Zh.B., Usalinov E.B., Shmatov B.B.* Model for calculating snow cover characteristics based on remote sensing data. *Science Bulletin of the Kazakh Agro Technical University named after S. Seifullin.* 2021, 4 (111): 44–49.
[https://doi.org/10.51452/kazatu.2021.4\(111\).782](https://doi.org/10.51452/kazatu.2021.4(111).782)