УДК 55.14
МРНТИ 37.37.25, 37.39.29
DOI 10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.98(2).85

[1]Денисова Н.Ф., [1]Петрова О.А., [2]Алпысбай М.А.[*], [2]Чепашев Д.В.

[1]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан
[2]Институт Ионосферы, Алматы, Казахстан

***Автор-корреспондент:** marua.alpysbay@gmail.com

E-mail: ndenisova@edu.ektu.kz, opetrova@edu.ektu.kz, d.chepashev@ionos.kz, marua.alpysbay@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ИНСОЛЯЦИИ И АЛЬБЕДО НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛАВИННОГО РИСКА В РАЗНЫХ ЭКСПОЗИЦИЯХ СКЛОНОВ

Аннотация. Формирование лавинного риска в горных регионах существенно зависит от комплекса природных факторов, включая инсоляцию и альбедо склонов. В данной работе исследуются влияние инсоляции, отражательной способности поверхности (альбедо) и их взаимосвязь с другими климатическими параметрами, такими как температура и снежный покров, на развитие лавинного риска в разных экспозициях склонов (северной, южной, восточной и западной). Используя данные дистанционного зондирования (MODIS, ERA5-Land, CHIRPS) и цифровую модель рельефа, проведен многолетний (2000–2024 гг.) анализ изменений снежного покрова, температуры и альбедо в зимний период. Результаты исследования показывают, что экспозиция склонов оказывает значительное влияние на уровень инсоляции, что, в свою очередь, определяет характер таяния снежного покрова и изменение лавинного риска. В работе представлены ключевые зависимости между инсоляцией, альбедо, снежным покровом и температурой, а также построена карта прогнозирования лавинного риска. Полученные результаты могут быть использованы для управления лавинной безопасностью и мониторинга склонов в условиях изменяющегося климата.

Ключевые слова: инсоляция; альбедо; лавинный риск; экспозиция склонов; снежный покров; дистанционное зондирование; уклон склонов; температурные процессы.

Введение

Большое количество энергии поступает к поверхности снежного покрова в виде прямой и рассеянной солнечной радиации. Однако лишь небольшая ее часть поглощается снегом, а остальная отражается от его поверхности [1]. Альбедо снежного покрова (отношение количества отраженной радиации к количеству падающей радиации) является одним из ключевых факторов, влияющих на радиационный баланс склонов, формирование снежного покрова и лавинный риск [1-3]. Вариации альбедо снежного покрова и инсоляции существенно изменяют термические процессы, что особенно важно в горных районах с выраженными различиями в экспозиции склонов [4-6].

Изменения альбедо влияют на скорость таяния снега, объем поглощенной радиации и термическую динамику склонов. Небольшое снижение альбедо может привести к значительному увеличению поглощенной солнечной радиации, что усиливает интенсивность таяния снега, изменяя сроки и интенсивность лавинообразования [7]. Высокие значения альбедо, напротив, способствуют снижению температуры воздуха, что замедляет процессы трансформации снежного покрова [2, 8-9].

Альбедо снежного покрова изменяется под влиянием структуры, влажности и загрязненности снега. Для свежевыпавшего снега альбедо составляет 0,80–0,95, что означает поглощение всего 5–20 % поступающей радиации. Для сухого переметенного снега альбедо снижается до 0,65–0,80. При увеличении влажности и в период таяния оно уменьшается до 0,40–0,60, а для загрязненного снега может составлять 0,20. В горных районах, где уклон и экспозиция склонов определяют количество поступающей радиации, наблюдаются значительные различия в термическом режиме снежного покрова [10].

Дистанционное зондирование позволяет эффективно анализировать пространственные и временные изменения альбедо снежного покрова, инсоляции, высоты покрова и температуры на региональном уровне [11]. Особое значение это имеет в оценке лавиноопасности, так как инсоляция склонов различной экспозиции и крутизны напрямую влияет на интенсивность трансформации снега. Северные склоны, характеризующиеся высоким альбедо, сохраняют снежный покров дольше, что увеличивает риск лавин, тогда как на южных склонах из-за усиленной инсоляции снег тает быстрее, снижая риск [2, 6].

Целью данного исследования является количественная оценка влияния инсоляции и альбедо на формирование лавинного риска на склонах различной экспозиции. Для этого планируется провести анализ взаимосвязи между солнечной радиацией, отражательной способностью снежного покрова и частотой схода лавин, учитывая ориентацию склонов и их уклон. Результаты исследования могут способствовать улучшению методов прогнозирования лавинной опасности и разработке эффективных мер по снижению рисков в горных районах.

Материалы и методы исследования

Область исследования. Восточно-Казахстанская область находится на восточной границе Казахстана, на стыке с Китаем, Монголией и Россией. Большую часть территории занимают Алтайские и Саур-Тарбагатайские горы, а также Калбинский хребет, с высотами, достигающими 4000 м [12]. Климат области резко континентальный. Зимы продолжительные, холодные и вьюжные, а лето жаркое и сухое, с пыльными бурями. Средняя температура января варьируется от -25 °C на равнинах до -40 °C в замкнутых высокогорных котловинах. В июле температура достигает +21 °C на северо-западе и +32 °C на юго-востоке. На высотах свыше 1 км преобладают восточные ветры со скоростью до 20 м/с. Снежный покров формируется преимущественно в зимний период. В отдельные годы в области наблюдаются обильные снегопады, особенно в горных районах, таких как Зыряновский, Катон-Карагайский, Кокпектинский, Урджарский районы и город Риддер. Толщина снежного покрова может превышать средние многолетние значения в 2–3 раза.

Исходные данные. Для выполнения исследования использовался интегрированный подход, включающий обработку данных дистанционного зондирования, климатических наборов данных и цифровой модели рельефа. Такой подход обеспечил высокую степень детализации анализа и возможность учитывать пространственно-временные изменения параметров. Вся обработка данных осуществлялась в платформе Google Earth Engine (GEE), что позволило эффективно интегрировать данные из различных источников и автоматизировать их обработку.

Источники данных. Для оценки снежного покрова, альбедо, температуры поверхности, температуры воздуха и осадков использовались данные следующих спутниковых миссий и климатических моделей:

Данные дистанционного зондирования:

- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer):

- MOD10A1: Ежедневные данные о снежном покрове. Использовался индекс NDSI (Normalized Difference Snow Index) для определения площади снежного

покрова и его сезонных изменений. Он рассчитывается на основе отражательной способности в видимом (Green) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах [13]:

$$NDSI = \frac{\rho Green - \rho SWIR}{\rho Green + \rho SWIR}$$

где:

$\rho Green$ – отражательная способность в зеленой части спектра,

$\rho SWIR$ – отражательная способность в коротковолновой инфракрасной части спектра.

Значение NDSI выше 0,4 указывают на наличие снега. Для оценки сезонных изменений снежного покрова вычислялось среднее значение индекса за зимние месяцы.

MCD43A3: Данные о кратковолновом альбедо поверхности (BSA — альбедо прямой солнечной радиации, WSA — альбедо рассеянной радиации). Эти данные использовались для анализа пространственно-временных вариаций отражательной способности снежного покрова. Общее альбедо поверхности рассчитывалось как среднее арифметическое [14]:

$$\alpha = \frac{\alpha BSA + \alpha WSA}{2}$$

- MOD11A1: Дневные и ночные температуры поверхности земли (LST_Day_1km и LST_Night_1km), что позволило оценить термический режим снежного покрова. Температура поверхности земли (LST) рассчитывалась для дневного ($T_{день}$) и ночного ($T_{ночь}$) режимов [15].

- CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation): Ежедневные данные об осадках с пространственным разрешением 0.05° (~5 км). Использовались для анализа зимнего объёма осадков и его влияния на снежный покров [16].

- GPM (Global Precipitation Measurement): Данные из коллекции IMERG_V06 с высоким разрешением (0.1°). Применялись для оценки интенсивности осадков в зимние периоды. Средняя интенсивность за день ($R_{день}$) вычислялась как:

$$R_{\text{день}} = \frac{\sum_{h=1} H\, R_h}{H}$$

где: R_h – интенсивность осадков за час h; H = 24 – количество часов в дне.

- ERA5-Land (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts): Температура воздуха на уровне 2 м над поверхностью земли (temperature_2m). Ежечасные данные (T_h) агрегировались для расчёта средних значений за зимние периоды:

$$T_{\text{день}} = \frac{\sum_{h=1} H\, T_h}{H}$$

где: H = 24 – количество часов в дне.

- Цифровая модель рельефа: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission): Данные с пространственным разрешением 30 м использовались для вычисления уклона (S), экспозиции (A) и высоты склонов над уровнем моря. Эти параметры стали основой для оценки термического режима склонов и поступающей радиации.

В рамках исследования дополнительно учитывались уклон (Slope) и экспозиция (Exposition) склонов, что позволило детализировать пространственные различия в распределении факторов, влияющих на лавинный риск. Эти параметры вычислялись на основе цифровой модели рельефа (SRTM) с использованием инструментов анализа рельефа, доступных в Google Earth Engine.

Расчёт уклона и экспозиции склонов. На основе данных DEM для каждого пикселя региона интереса (ROI) были рассчитаны уклон и экспозиция. Уклон (Slope) — это угол наклона поверхности относительно горизонтальной плоскости. Вычислялся с

использованием стандартной функции ee.Terrain.slope, предоставляемой в Google Earth Engine [17]:

$$Slope = \arctan\left(\frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}\right)$$

где: Δz – изменение высоты между соседними пикселями; Δx и Δy – горизонтальные расстояния между пикселями.

Рассчитанный уклон использовался для выделения склонов, попадающих в диапазон лавинного риска ($30^o \leq S \leq 45^o$).

Экспозиция (Exposition) это направление наклона поверхности относительно северного направления. Вычислялась с использованием функции ee.Terrain.aspect [17]:

$$Exposition = arctan2\left(\frac{-\Delta y}{\Delta x}\right)$$

где: Δx и Δy – горизонтальные изменения координат,

Результат выражается в градусах (0^o – север, 90^o – восток, 180^o – юг, 270^o – запад).

Исследование охватывает зимние периоды (декабрь, январь, февраль) за 24 года — с 2000 по 2024 годы. Такой длительный временной диапазон позволяет анализировать как сезонные, так и многолетние тенденции в изменении снежного покрова, альбедо и других факторов, влияющих на лавинный риск.

Пространственная и сезонная агрегация. Для анализа климатических и снежных характеристик на региональном уровне была выполнена пространственная агрегация параметров (снежный покров, альбедо, температура и осадки). Пространственное усреднение выполнялось с использованием функции reduceRegion в GEE, и средние значения параметров рассчитывались по формуле:

$$\bar{X} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i,$$

где: $\bar{X}$ – среднее значение параметра; X_i – значение параметра для i-го пикселя; N – общее количество пикселей в анализируемом регионе.

Для исключения влияния межсезонных вариаций данные агрегировались за зимние периоды (декабрь, январь, февраль). Средние сезонные значения ($\bar{X}_{\text{зима}}$) вычислялись по формуле:

$$\bar{X}_{\text{зима}} = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} \bar{X}_j,$$

где: $\bar{X}_j$ – среднее значение параметра для месяца j; M – 3-количество месяцев в зимнем периоде.

Расчет радиационных характеристик. На основе данных уклона и экспозиции склонов проводились радиационные расчёты. Инсоляция (I) рассчитывалась с учётом

углов уклона (S) и азимута склонов (A), а также положения солнца. Уровень поступающей радиации определялся по формуле:

$$I = I_0 * \cos(Z) * \cos(S) + I_0 * \sin(Z) * \cos(A - A_s) * \sin(S),$$

где: I – инсоляция (Вт/м^2); I_0 – солнечная постоянная (1361 Вт/м^2); Z – зенитный угол солнечных лучей; A – азимут экспозиции склона; A_s – азимут солнца; S – угол склона склона.

Расчитанная инсоляция использовались для оценки различий в поступающей радиации между экспозициями склонов.

Картографирование лавинного риска. Лавинный риск (R) моделировался как функция нескольких факторов: уклона (S), инсоляции (I), снежного покрова (H), температуры (T) и альбедо (α). Общая формула для оценки риска выглядела следующим образом [18-20]:

$$R = f(S, Exposition, I, H, T, \alpha),$$

где:

S – уклон ($30^o \leq S \leq 45^o$); Exposition – экспозиция склона; I – инсоляция ($I > 0.5$); H – снежный покров (H > 50%); T – температура (T > - 5^{o}C); α – альбедо ($\alpha < 0{,}5$).

Вероятность лавинного риска определялась бинарной функцией:

$$P(R) = \begin{cases} 1, & \text{если условие выполняется,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Обработка аномальных данных. Особое внимание уделялось обработке аномальных значений. Для предотвращения искажений анализа: пустые пиксели заменялись значением 000, размер коллекций данных проверялся до выполнения операций, выбросы инспектировались и исключались из расчётов.

Результаты и их обсуждение.

Анализ данных MODIS (MCD43A3) показал, что альбедо снежного покрова демонстрирует выраженные пространственные и временные вариации, обусловленные изменением температуры, влажности и экспозиции склонов. Для свежевыпавшего снега альбедо составляет 0.80−0.95, однако с увеличением температуры и загрязнённости снега оно снижается до 0.20−0.40, особенно на южных и восточных склонах с высокой инсоляцией. В ранние годы (2000–2010 гг.) наблюдаются высокие значения альбедо, особенно в высокогорных районах, что свидетельствует о сохранении снежного покрова на северных и западных склонах. В последние годы (2015–2024 гг.) прослеживается снижение альбедо, особенно в низкогорных и среднегорных районах. Эта тенденция может быть связана с изменениями климата, повышением температуры и загрязнением снежного покрова. Северные склоны продолжают демонстрировать устойчиво высокие значения альбедо, что обусловлено меньшей инсоляцией и длительным сохранением снежного покрова, в отличие от южных и восточных склонов, где альбедо снижается из-за более интенсивного таяния снега. Регрессионный анализ зависимости альбедо (α) от температуры (T) и снежного покрова (H) позволил количественно оценить эти связи. Она имела следующий вид:

$$\alpha = \beta_0 + \beta_1 * T + \beta_2 * H + \varepsilon$$

где: β_0 – свободный член; β_1, β_2 – коэффициенты регрессии; ε – остаточный компонент.

Результаты показали, что повышение температуры (T) оказывает отрицательное влияние на альбедо ($\beta_1 = -0{,}016, \rho < 0.01$), а увеличение снежного покрова (H) способствует его росту ($\beta_2 = 0.045, \rho < 0.01$). Это указывает на важность альбедо как фактора, замедляющего процессы таяния снега. Однако регрессионный анализ зависимости лавинного риска от альбедо (α) показал, что его роль в лавинообразовании ограничена. Влияние альбедо проявляется через косвенные связи: оно влияет на сохранение снежного покрова (r=0.16) и частично связано с температурным режимом (r=−0.16). Тем не менее, основным фактором лавинообразования альбедо не является. На рисунке-1 представлены зависимости альбедо снежного покрова от уклона поверхности для различных зимних месяцев (ноябрь – март). Диаграммы показывают распределение площадей склонов, сгруппированных по категориям уклона (0–20°, 20–30°, 30–45°, 45–60°, 60–80°) и диапазонам значений альбедо (0–20%, 20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100%). Наиболее высокие значения альбедо характерны для небольших уклонов (0–20°), в то время как при увеличении уклона наблюдается снижение альбедо, особенно в диапазонах 20–40% и ниже. Изменения, представленные для каждого месяца, отражают сезонные особенности снежного покрова и его отражательной способности.

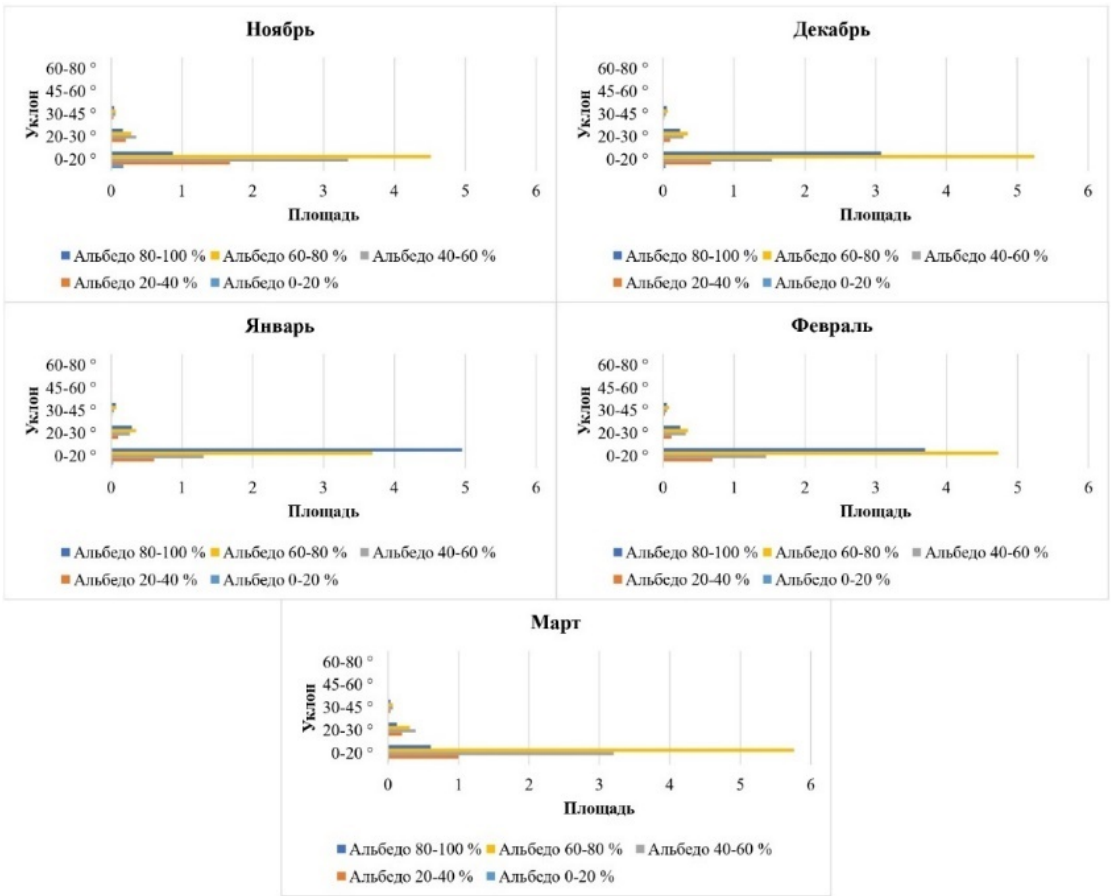

Рисунок-1. Распределение альбедо по категориям крутизны склона

Снежный покров и его связь с экспозицией склонов. Данные MOD10A1 выявили значительные пространственные различия в устойчивости снежного покрова (H) в зависимости от экспозиции склонов (рис.2). Северные и западные склоны характеризуются более высоким уровнем снежного покрова (30−50%) из-за низкой инсоляции (рис.4) и температуры. На южных склонах снежный покров менее стабилен (20−30%) из-за более интенсивной солнечной радиации.

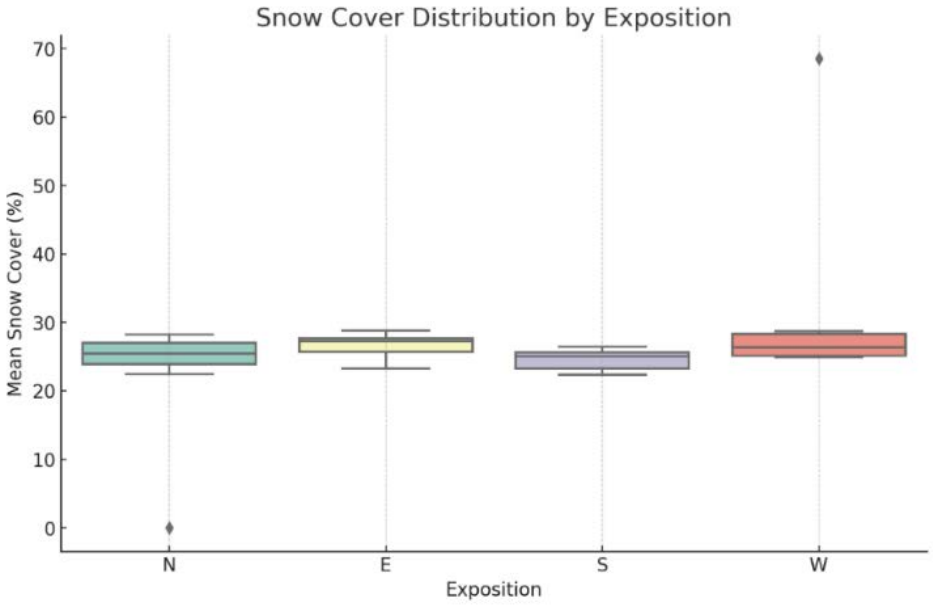

Рисунок-2. Распределение снежного покрова в зависимости от экспозиции склонов

Для количественного анализа использовалась линейная регрессионная модель:

$$H = \gamma_0 + \gamma_1 * I + \gamma_2 * T + \gamma_3 * E + \varepsilon$$

где: H – снежный покров; I – инсоляция; T – температура; E – экспозиция, закодированная как категориальная переменная; $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – коэффициенты регрессии.

Результаты показали, что инсоляция (I) и температура (T) оказывают отрицательное влияние на снежный покров ($\gamma_1 = -0.07, \rho < 0.01$; $\gamma_2 = -1.2, \rho < 0.01$). Северная экспозиция, напротив, положительно коррелирует с высотой снежного покрова ($\gamma_3 = 5.6, \rho < 0.01$).

Инсоляция и лавинный риск. Данные анализа инсоляции, рассчитанной на основе цифровой модели рельефа (SRTM) (рис.4), показали, что южные и восточные склоны получают максимальное количество солнечной радиации. Это приводит к снижению снежного покрова и уменьшению лавинного риска. Северные и западные склоны, напротив, получают меньше солнечной энергии, что способствует сохранению снежного покрова и увеличению вероятности лавинообразования (рис. 3).

Для визуализации вероятности лавинного риска (R) использовалась логистическая регрессия:

$$P(R=1) = \frac{1}{1+\exp(-(\delta_0 + \delta_1 * I + \delta_2 * S + \delta_3 * T + \delta_4 * H + \delta_5 * \alpha}$$

где: P(R=1) – вероятность лавины; I, S, T, H, α – инсоляция, уклон, температура, снежный покров и альбедо; $\delta_0, \delta_1, \delta_2, \ldots . \delta_5$ – коэффициенты регрессии.

Результаты показали, что инсоляция (I) и уклон (S) оказывают положительное влияние на лавинный риск ($\delta_1 = 0.25, \rho < 0.01$; $\delta_2 = 0.15, \rho < 0.01$), а альбедо (α) и температура (T) снижают риск ($\delta_5 = -0.18, \rho < 0.01$).

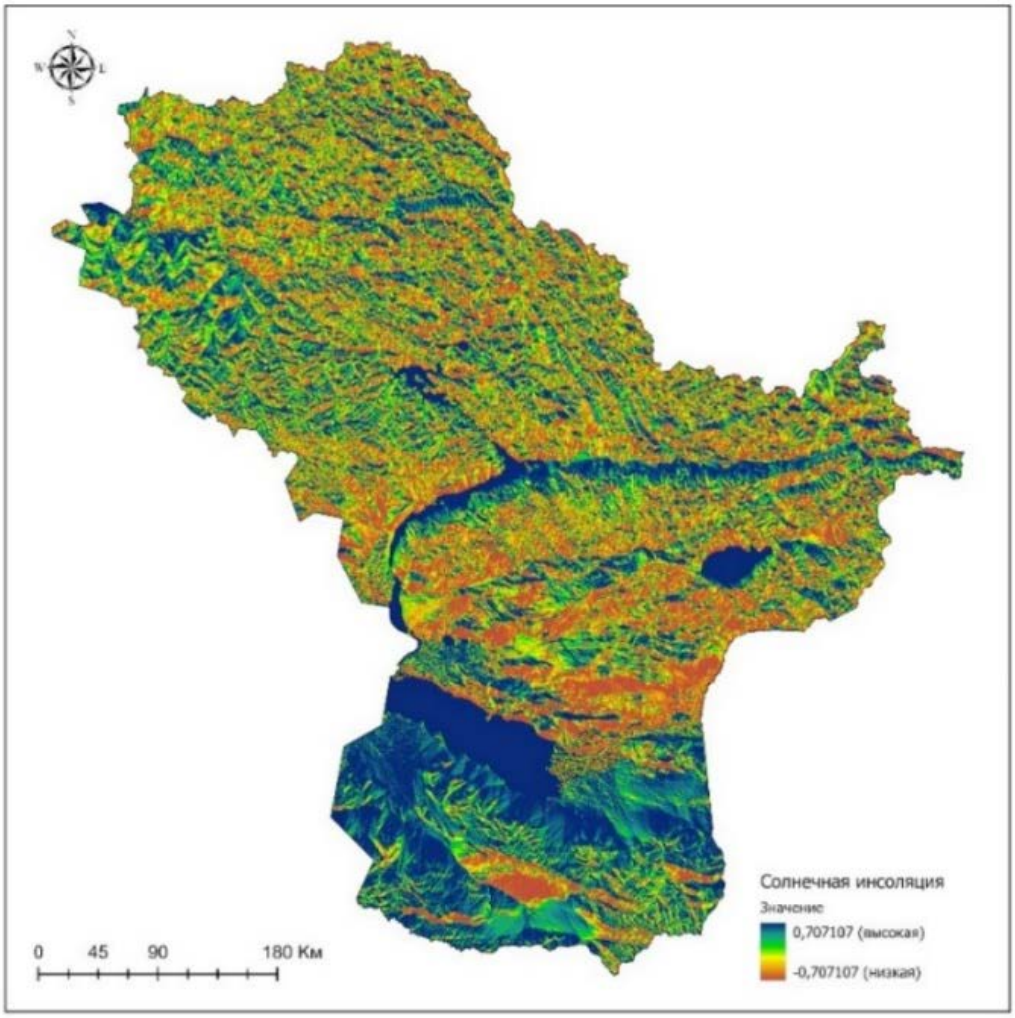

Рисунок-3. Пространственное распределение солнечной инсоляции в регионе исследования

Температурный режим. Анализ данных MOD11A1 и ERA5-Land подтвердил значительные различия в температуре воздуха и поверхности в зависимости от экспозиции склонов. Северные склоны с низкой инсоляцией демонстрируют зимние температуры до −15°C, тогда как на южных склонах температура может достигать −5°C.

Регрессионная модель зависимости температуры (T) от экспозиции (E) и высоты (h) приняла следующий вид:

$$T = \mu_0 + \mu_1 * h + \mu_2 * E + \varepsilon$$

где: T – температура; h – высота; E – экспозиция; μ_0, μ_1, μ_2 – коэффициенты регрессии.

Результаты показали, что температура уменьшается с увеличением высоты ($\mu_1 = -0.006, \rho < 0.01$) и ниже на северных склонах ($\mu_2 = -2.5, \rho < 0.01$). Высокие значения снежного покрова на северных склонах при низких температурах создают благоприятные условия для лавинообразования. Также высота снежного покрова (H) и температурный режим (T) являются основными факторами, определяющими лавинный риск. Регрессионная модель показала сильную положительную корреляцию между снежным покровом и лавинным риском (r=0.87). Высокие значения снежного покрова на северных склонах при низких температурах создают благоприятные условия для лавинообразования.

Лавинный риск и корреляционный анализ. Карта лавинного риска продемонстрировала высокую точность прогнозирования. Северные и западные склоны с низкой температурой и устойчивым снежным покровом остаются наиболее лавиноопасными, несмотря на высокое альбедо. Южные и восточные склоны, напротив, демонстрируют меньший лавинный риск из-за интенсивной инсоляции и таяния снега.

Корреляционные матрицы показали (рис.4):

- Лавинный риск на северных склонах наиболее сильно коррелирует с высотой снежного покров (r=0.81).
- На южных склонах снижение лавинного риска больше зависит от температуры (r=−0.45).
- Альбедо оказывает наибольшее влияние на северных и западных склонах (r=0.15).

Логистическая регрессия вероятности лавинообразования подтвердила, что основные детерминанты лавинного риска — это снежный покров (H) и температура (T), а также уклон (S). Альбедо (α) и инсоляция (I) играют вспомогательную роль. Для оценки точности карты лавинного риска были сопоставлены предсказанные данные (карта лавинного риска) с фактическими лавиноопасными участками, предоставленными в виде векторных данных. Анализ производился на основе двух ключевых метрик: общей точности (Overall Accuracy) и коэффициента каппа (Kappa Coefficient), которые являются стандартными показателями для оценки соответствия модели реальным данным. Результаты анализа показывают, что общая точность модели составляет 86%, что свидетельствует о высокой степени совпадения предсказанных лавиноопасных зон с фактическими данными. Коэффициент каппа равен 0.72, что указывает на «значительное согласие» между предсказаниями модели и наблюдениями, превышающее случайное совпадение. Высокая точность модели обусловлена использованием ключевых факторов, таких как уклон, инсоляция, снежный покров, температура и альбедо.

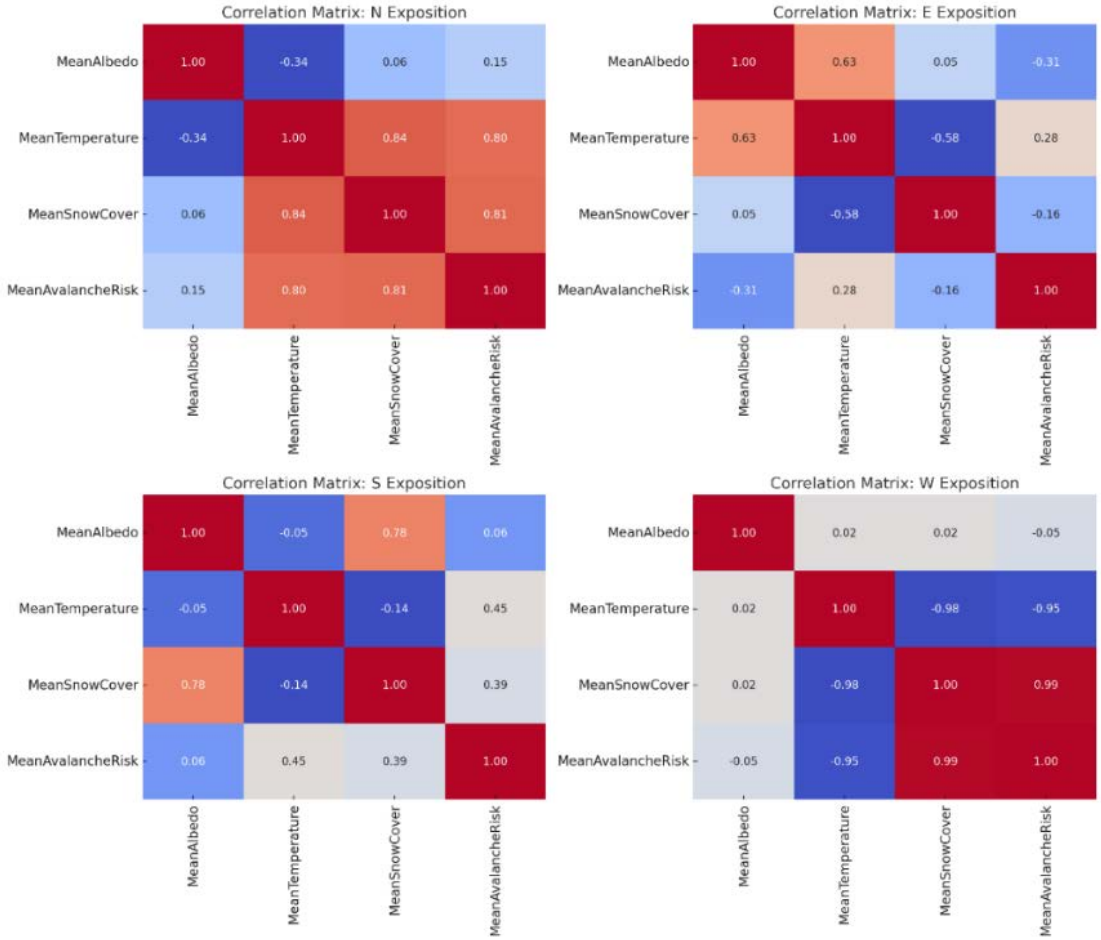

Рисунок-4. Корреляционные матрицы для различных экспозиций склонов

График матрицы рассеяния (рис.5) иллюстрирует взаимосвязи между ключевыми переменными: альбедо (MeanAlbedo), лавинным риском (MeanAvalancheRisk), снежным покровом (MeanSnowCover) и температурой (MeanTemperature). Для анализа были использованы данные, упомянутые ранее, включая корреляционные зависимости, пространственные изменения и результаты регрессионного анализа. На диаграмме рассеяния видно, что прямая связь между альбедо и лавинным риском практически отсутствует. Распределение точек носит хаотичный характер, что подтверждает низкую корреляцию между этими переменными (r=0.07). Этот результат согласуется с выводом из предыдущего анализа: альбедо оказывает лишь косвенное влияние на лавинный риск, через его связь со снежным покровом и температурой. Диаграмма показывает отчетливую положительную связь между высотой снежного покрова и лавинным риском. Чем выше снежный покров (MeanSnowCover), тем больше вероятность лавинообразования. Корреляция между этими параметрами (r=0.87) подтверждает, что высота снежного покрова является ключевым фактором лавинного риска. На северных склонах с более высоким снежным покровом лавинный риск возрастает, что согласуется с ранее построенными регрессионными моделями. Диаграмма рассеяния демонстрирует отрицательную связь между температурой (MeanTemperature) и лавинным риском. При более низких температурах риск лавин значительно выше. Корреляция между этими параметрами составляет (r=−0.54), что объясняется длительным сохранением снежного

покрова при низких температурах, особенно на северных склонах. На южных склонах, где температура выше, лавинный риск снижен. Наблюдается слабая положительная связь между альбедо (MeanAlbedo) и снежным покровом (MeanSnowCover), что подтверждается корреляцией (r=0.16). Это указывает на то, что высокое альбедо помогает замедлить таяние снежного покрова, что косвенно влияет на его устойчивость. Однако, как показывают данные, этот эффект выражен слабее по сравнению с температурой.

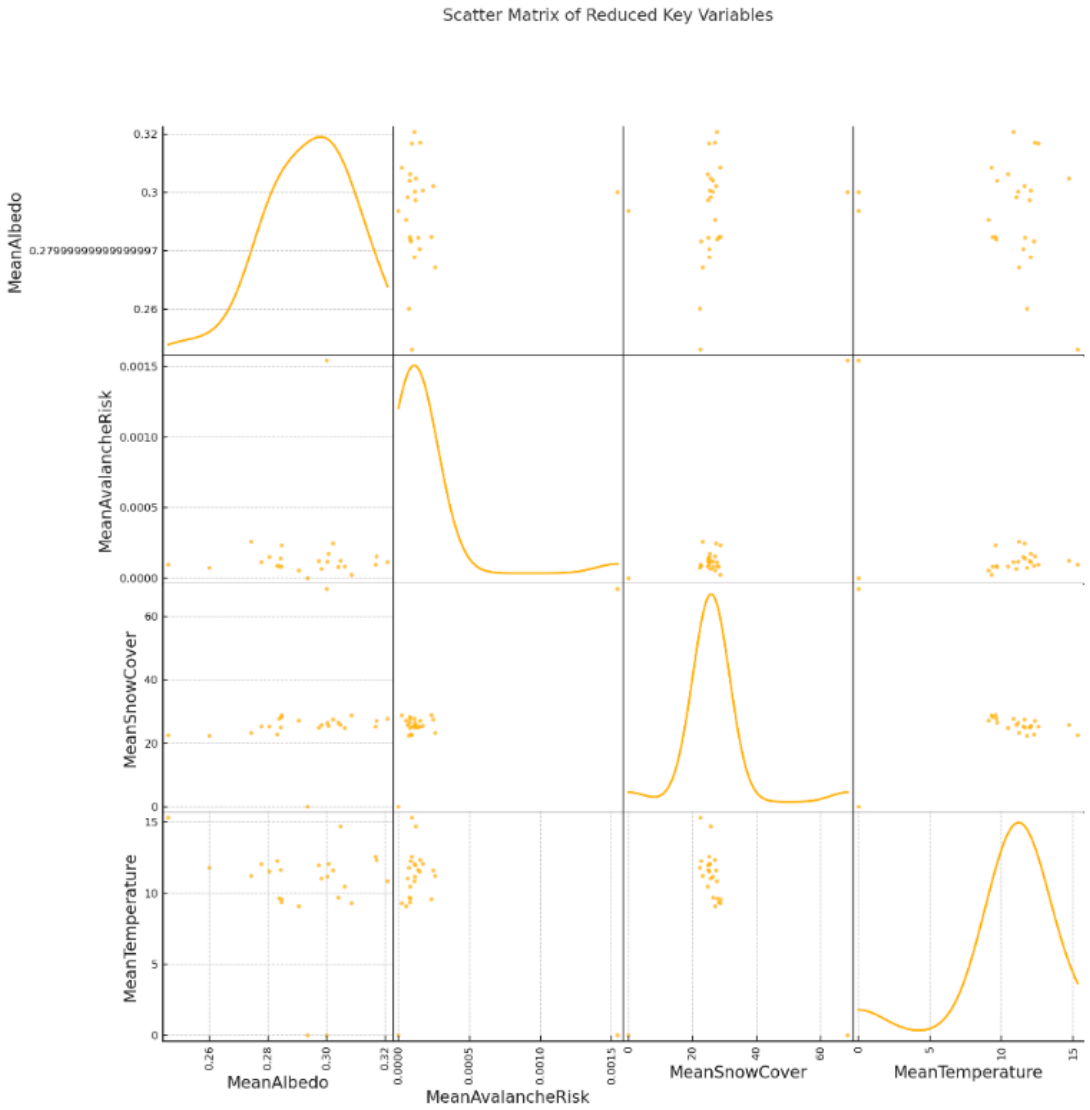

Рисунок-5. График матрицы рассеяния

Диаграмма иллюстрирует четкую отрицательную связь между температурой (MeanTemperature) и снежным покровом (MeanSnowCover). При более низкой температуре снежный покров сохраняется лучше (r=−0.25). Это связано с меньшей скоростью таяния снега при отрицательных температурах.

Анализ матрицы рассеяния показал, что высота снежного покрова и температура являются основными детерминантами лавинного риска. Высокие значения снежного покрова увеличивают вероятность лавин, особенно на северных склонах, где снег

сохраняется дольше из-за низкой температуры и недостатка солнечной инсоляции. Температура, в свою очередь, оказывает решающее влияние на лавинообразование: при низких температурах сохраняется стабильность снежного покрова, что увеличивает вероятность лавин, особенно на теневых склонах.

Альбедо и инсоляция играют вспомогательную роль, воздействуя на долговечность и устойчивость снежного покрова. Альбедо связано со снежным покровом (r=0.16r = 0.16r=0.16), так как высокое альбедо способствует снижению поглощения солнечной радиации и замедляет процессы таяния снега. Однако его прямое влияние на лавинный риск минимально. Инсоляция также влияет на снежный покров, но её вклад второстепенен по сравнению с ключевыми факторами, такими как температура и высота снега.

Основные факторы лавинного риска связаны с температурным режимом и высотой снежного покрова, в то время как альбедо и инсоляция выполняют вспомогательную роль, влияя на пространственно-временные изменения снежного покрова.

Полученные результаты показывают, что высота снежного покрова и температура являются ключевыми факторами лавинообразования, а альбедо и инсоляция оказывают лишь косвенное влияние на эти процессы. Северные и западные склоны, имеющие низкую инсоляцию и отрицательную температуру, остаются наиболее лавиноопасными. Южные и восточные склоны, напротив, характеризуются меньшим снежным покровом и, соответственно, более низким риском лавин.

Данные дистанционного зондирования и климатических моделей позволили создать многопараметрическую карту лавинного риска, которая учитывает как основные факторы (такие как снежный покров и температура), так и вспомогательные (инсоляция, альбедо). Эти результаты имеют практическую значимость для управления лавинной безопасностью, повышения точности прогнозов и разработки стратегий адаптации к изменению климата в горных районах.

Заключение.

В ходе проведенного исследования была изучена роль альбедо, инсоляции, высоты снежного покрова, уклона, температуры и экспозиции склонов в формировании лавинного риска. Пространственно-временные данные, полученные на основе анализа дистанционного зондирования (MODIS, ERA5-Land, CHIRPS) и цифровой модели рельефа (SRTM), позволили выявить ключевые закономерности взаимодействия климатических, рельефных и снежных факторов.

Анализ показал, что высота снежного покрова и температура являются основными факторами, определяющими лавинный риск. Корреляция между снежным покровом и лавинным риском достигла значений r=0.87, что свидетельствует о прямом влиянии накопления снега на вероятность лавинообразования. Температура, в свою очередь, оказывает отрицательное влияние на сохранение снежного покрова (r=−0.25), способствуя его таянию, особенно на южных и восточных склонах, где инсоляция выше.

Альбедо снежного покрова демонстрирует сезонные и пространственные вариации, но его влияние на лавинный риск остается вспомогательным. Наибольшая отражательная способность наблюдается на северных склонах, где снежный покров сохраняется дольше благодаря низкой температуре и меньшей инсоляции. Однако влияние альбедо проявляется косвенно, через воздействие на энергетический баланс поверхности и, как следствие, на скорость таяния снега.

Инсоляция играет значительную роль в формировании температурного режима и распределении снежного покрова. Южные и восточные склоны, получающие больше солнечной энергии, демонстрируют более низкий уровень снежного покрова и, как следствие, меньший лавинный риск. На северных и западных склонах, где солнечная

радиация ограничена, сохраняются условия для высокого лавинного риска. Результаты регрессионного анализа подтвердили, что ключевыми детерминантами лавинного риска являются высота снежного покрова и уклон склона. Логистическая модель вероятности лавинообразования показала, что уклон (S) и высота снежного покрова (H) являются наиболее значимыми предикторами, в то время как альбедо и температура оказывают влияние на риск косвенно. Пространственно-временные карты альбедо, высоты снежного покрова и лавинного риска продемонстрировали, что наиболее опасные зоны расположены на теневых склонах с высокими значениями снежного покрова и низкими температурами. Южные и восточные склоны, несмотря на их большую инсоляцию, характеризуются более низкой лавинной активностью из-за меньшего накопления снега. Полученные данные подчеркивают важность комплексного подхода к оценке лавинного риска, учитывающего климатические, рельефные и снежные факторы. Разработанные карты могут быть использованы для прогнозирования лавинной активности, повышения безопасности в горных регионах и адаптации к изменяющимся климатическим условиям. Эти результаты также подчеркивают важность применения дистанционного зондирования и интеграции данных для управления рисками и оптимизации методов защиты в горных районах.

Благодарности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR21882022 «Исследование лавинной активности в Восточно-Казахстанской области для разработки систем мониторинга и научного обоснования их размещения»).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Войтковский К.Ф. Лавиноведение: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 105 с.

[2] Журавлева Т. Б., Кохановский А. А. Влияние горизонтальной неоднородности на альбедо и поглощательную способность снежного покрова //Метеорология и гидрология. – 2010. – №. 9. – С. 17-25. URL: https://rucont.ru/efd/333986

[3] Marshall S., Oglesby R. J. An improved snow hydrology for GCMs. Part 1: Snow cover fraction, albedo, grain size, and age //Climate Dynamics. – 1994. – Т. 10. – С. 21-37. https://doi.org/10.1007/BF00210334

[4] Washington W. M., Meehl G. A. General circulation model CO2 sensitivity experiments: Snow-sea ice albedo parameterizations and globally averaged surface air temperature //Climatic Change. – 1986. – Т. 8. – №. 3. – С. 231-241. https://doi.org/10.1007/BF00161596

[5] Жданов, В. В., Кужагельдина, Н. У., Камалбекова, А. Н., & Алдаберген, Ұ. Р. (2024). СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ О СХОДЕ СНЕЖНЫХ ЛАВИН И СНЕЖНО-МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ГОРАХ ИЛЕ АЛАТАУ. География и водные ресурсы, (2), 99-110.

[6] Seidel F. C. et al. Case study of spatial and temporal variability of snow cover, grain size, albedo and radiative forcing in the Sierra Nevada and Rocky Mountain snowpack derived from imaging spectroscopy //The Cryosphere. – 2016. – Т. 10. – №. 3. – С. 1229-1244. https://doi.org/10.5194/tc-10-1229-2016

[7] Stroeve J., Nolin A., Steffen K. Comparison of AVHRR-derived and in situ surface albedo over the Greenland ice sheet //Remote Sensing of Environment. – 1997. – Т. 62. – №. 3. – С. 262-276. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(97)00107-7

[8] Baker D. G. et al. Air temperature and radiation depressions associated with a snow cover //Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1992. – Т. 31. – №. 3. – С. 247-254. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0247:ATARDA>2.0.CO;2

[9] Picard G. et al. Spectral albedo measurements over snow-covered slopes: theory and slope effect corrections //The Cryosphere. – 2020. – Т. 14. – №. 5. – С. 1497-1517. https://doi.org/10.5194/tc-14-1497-2020

[10] Ramtvedt E. N., Næsset E. A simple slope correction of horizontally measured albedo in sloping terrain //Agricultural and Forest Meteorology. – 2023. – Т. 339. – С. 109547. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109547

[11] Andres-Anaya P. et al. A New Methodology for Estimating Surface Albedo in Heterogeneous Areas from Satellite Imagery //Applied Sciences. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – С. 75. https://doi.org/10.3390/app14010075

[12] Чодураев Т. М., Намазбаева З. Е. Оценка природных туристско-рекреационных ресурсов Восточно-Казахстанской области //Известия Ошского технологического университета. – 2020. – №. 1. – С. 199-206.

[13] Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2010). Normalized-difference snow index (NDSI). Encyclopedia of snow, ice and glaciers.

[14] Wenzhe, Z. H. U., Dongqin, Y. O. U., Jianguang, W. E. N., Qiang, L. I. U., & Tang, Y. (2023). Evaluating the Performance of MODIS Albedo Products (MCD43A3) over Seasonal Snow-covered Land Surface. Remote Sensing Technology and Application, 38(6), 1295-1305.

[15] Zhao, R., Yu, W., Deng, X., Huang, Y., Yang, W., & Zhou, W. (2024). Analysis of Land Surface Performance Differences and Uncertainty in Multiple Versions of MODIS LST Products. Remote Sensing, 16(22), 4255.

[16] Shen, Z., Yong, B., Gourley, J. J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., ... & Zhang, J. (2020). Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). Journal of Hydrology, 591, 125284.

[17] Google Earth Engine. ee.Terrain.slope [Электронный ресурс]. URL: https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-terrain-slope (дата обращения: 10.12.2024).

[18] Rafique, A., Dasti, M. Y., Ullah, B., Awwad, F. A., Ismail, E. A., & Saqib, Z. A. (2023). Snow Avalanche Hazard Mapping Using a GIS-Based AHP Approach: A Case of Glaciers in Northern Pakistan from 2012 to 2022. Remote Sensing, 15(22), 5375.

[19] Denissova, N., Nurakynov, S., Petrova, O., Chepashev, D., Daumova, G., & Yelisseyeva, A. (2024). Remote Sensing Techniques for Assessing Snow Avalanche Formation Factors and Building Hazard Monitoring Systems. Atmosphere, 15(11), 1343.

[20] Rahmati O. et al. Spatial modeling of snow avalanche using machine learning models and geo-environmental factors: Comparison of effectiveness in two mountain regions //Remote sensing. – 2019. – Т. 11. – №. 24. – С. 2995.

REFERENCES

[1] Voitkovskiy K.F. Lavinovedenie: Ucheb. posobie. – M.: Izd-vo MGU, 1989. – 105 s. [Voitkovskiy K.F. Avalanche Studies: Textbook. – Moscow: Moscow State University Publishing House, 1989. – 105 p.]]

[2] Zhuravleva T.B., Kokhanovskiy A.A. Vliyanie gorizontal'noy neodnorodnosti na albedo i pogloshchatel'nuyu sposobnost' snezhnogo pokrova //Meteorologiya i gidrologiya. – 2010. – №. 9. – S. 17-25. [Zhuravleva T.B., Kokhanovskiy A.A. Influence of Horizontal Inhomogeneity on the Albedo and Absorptive Capacity of Snow Cover //Meteorology and Hydrology. – 2010. – No. 9. – P. 17-25.]

[3] Marshall S., Oglesby R. J. An improved snow hydrology for GCMs. Part 1: Snow cover fraction, albedo, grain size, and age //Climate Dynamics. – 1994. – Т. 10. – С. 21-37. https://doi.org/10.1007/BF00210334

[4] Washington W. M., Meehl G. A. General circulation model CO2 sensitivity experiments: Snow-sea ice albedo parameterizations and globally averaged surface air temperature //Climatic Change. – 1986. – Т. 8. – №. 3. – С. 231-241. https://doi.org/10.1007/BF00161596

[5] Zhuravleva T.B., Kokhanovskiy A.A. Vliyanie gorizontal'noy neodnorodnosti na albedo i pogloshchatel'nuyu sposobnost' snezhnogo pokrova //Meteorologiya i gidrologiya. – 2010. – №. 9. – S. 17-25. [Zhuravleva T.B., Kokhanovskiy A.A. Influence of Horizontal Inhomogeneity on the Albedo and Absorptive Capacity of Snow Cover //Meteorology and Hydrology. – 2010. – No. 9. – P. 17-25.]

[6] Seidel F. C. et al. Case study of spatial and temporal variability of snow cover, grain size, albedo and radiative forcing in the Sierra Nevada and Rocky Mountain snowpack derived from imaging spectroscopy //The Cryosphere. – 2016. – Т. 10. – №. 3. – С. 1229-1244. https://doi.org/10.5194/tc-10-1229-2016

[7] Stroeve J., Nolin A., Steffen K. Comparison of AVHRR-derived and in situ surface albedo over the Greenland ice sheet //Remote Sensing of Environment. – 1997. – Т. 62. – №. 3. – С. 262-276. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(97)00107-7

[8] Baker D. G. et al. Air temperature and radiation depressions associated with a snow cover //Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1992. – Т. 31. – №. 3. – С. 247-254. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0247:ATARDA>2.0.CO;2

[9] Picard G. et al. Spectral albedo measurements over snow-covered slopes: theory and slope effect corrections //The Cryosphere. – 2020. – Т. 14. – №. 5. – С. 1497-1517. https://doi.org/10.5194/tc-14-1497-2020

[10] Ramtvedt E. N., Næsset E. A simple slope correction of horizontally measured albedo in sloping terrain //Agricultural and Forest Meteorology. – 2023. – Т. 339. – С. 109547. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109547

[11] Andres-Anaya P. et al. A New Methodology for Estimating Surface Albedo in Heterogeneous Areas from Satellite Imagery //Applied Sciences. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – С. 75. https://doi.org/10.3390/app14010075

[12] Choduraev T.M., Namazbaeva Z.E. Otsenka prirodnykh turistsko-rekreatsionnykh resursov Vostochno-Kazakhstanskoy oblasti //Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2020. – №. 1. – S. 199-206. [Choduraev T.M., Namazbaeva Z.E. Assessment of Natural Tourist and Recreational Resources of East Kazakhstan Region //Bulletin of Osh Technological University. – 2020. – No. 1. – P. 199–206.]

[13] Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2010). Normalized-difference snow index (NDSI). Encyclopedia of snow, ice and glaciers.

[14] Wenzhe, Z. H. U., Dongqin, Y. O. U., Jianguang, W. E. N., Qiang, L. I. U., & Tang, Y. (2023). Evaluating the Performance of MODIS Albedo Products (MCD43A3) over Seasonal Snow-covered Land Surface. Remote Sensing Technology and Application, 38(6), 1295-1305.

[15] Zhao, R., Yu, W., Deng, X., Huang, Y., Yang, W., & Zhou, W. (2024). Analysis of Land Surface Performance Differences and Uncertainty in Multiple Versions of MODIS LST Products. Remote Sensing, 16(22), 4255.

[16] Shen, Z., Yong, B., Gourley, J. J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., ... & Zhang, J. (2020). Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). Journal of Hydrology, 591, 125284.

[17] Google Earth Engine. ee.Terrain.slope [Электронный ресурс]. URL: https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-terrain-slope (дата обращения: 10.12.2024).

[18] Rafique, A., Dasti, M. Y., Ullah, B., Awwad, F. A., Ismail, E. A., & Saqib, Z. A. (2023). Snow Avalanche Hazard Mapping Using a GIS-Based AHP Approach: A Case of Glaciers in Northern Pakistan from 2012 to 2022. Remote Sensing, 15(22), 5375.

[19] Denissova, N., Nurakynov, S., Petrova, O., Chepashev, D., Daumova, G., & Yelisseyeva, A. (2024). Remote Sensing Techniques for Assessing Snow Avalanche Formation Factors and Building Hazard Monitoring Systems. Atmosphere, 15(11), 1343.

[20] Rahmati O. et al. Spatial modeling of snow avalanche using machine learning models and geo-environmental factors: Comparison of effectiveness in two mountain regions //Remote sensing. – 2019. – Т. 11. – №. 24. – С. 2995.

Денисова Н.Ф., Петрова О.А., Алпысбай М.А., Чепашев Д.В.

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ОБЛЫСЫНДАҒЫ ҚАР БЕТІНІҢ АЛЬБЕДОСЫНЫҢ ӨЗГЕРГІШТІГІНІҢ КЕҢІСТІКТІК-МАУСЫМДЫҚ ТАЛДАУЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚАР КӨШКІНІ ҚАУПІМЕН БАЙЛАНЫСЫ

Аңдатпа. Тау аймақтарындағы қар көшкінінің қаупі табиғи факторлар кешеніне, соның ішінде инсоляция мен бетінің шағылысу қабілеттілігіне (альбедо) байланысты. Бұл зерттеуде инсоляцияның, бетінің шағылысу қабілеттілігінің (альбедо) және олардың температура мен қар жамылғысы сияқты басқа климаттық параметрлермен байланысының әртүрлі экспозицияларда (солтүстік, оңтүстік, шығыс және батыс беткейлерінде) қар көшкінінің қаупіне әсері қарастырылды. Қашықтықтан зондтау деректерін (MODIS, ERA5-Land, CHIRPS) және цифрлық рельеф моделін пайдалана отырып, қысқы кезеңдегі қар жамылғысы, температура және альбедо өзгерістеріне 2000–2024 жылдар аралығында көпжылдық талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, беткейлердің экспозициясы инсоляция деңгейіне айтарлықтай әсер етеді, бұл өз кезегінде қар жамылғысының еру сипатын және қар көшкінінің қауіп-қатерінің өзгеруін анықтайды. Зерттеуде инсоляция, альбедо, қар жамылғысы және температура арасындағы негізгі тәуелділіктер көрсетіліп, қар көшкінінің қаупін болжауға арналған модель әзірленді. Алынған нәтижелер климаттың өзгеру жағдайында беткейлерді қауіпсіз басқару және мониторинг жасау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кілт сөздер: Инсоляция; альбедо; қар көшкінінің қаупі; беткейлердің экспозициясы; қар жамылғысы; қашықтықтан зондтау; беткейлердің еңісі; температуралық процестер

Denisova N.F., Petrova O.A., Alpysbay M.A., Chepashev D.V.

THE IMPACT OF INSOLATION AND ALBEDO ON AVALANCHE RISK FORMATION IN DIFFERENT SLOPE ASPECTS

The formation of avalanche risk in mountainous regions is significantly influenced by a complex interplay of natural factors, including slope insolation and albedo. This study investigates the impact of insolation, surface reflectivity (albedo), and their relationship with other climatic parameters, such as temperature and snow cover, on the development of avalanche risk across different slope aspects (north, south, east, and west). Using remote sensing data (MODIS, ERA5-Land, CHIRPS) and a digital elevation model, a multi-year (2000–2024) analysis of changes in snow cover, temperature, and albedo during the winter period was conducted. The results of the study demonstrate that slope aspect significantly affects insolation levels, which, in turn, determine the melting dynamics of snow cover and variations in avalanche risk. The study highlights key relationships between insolation, albedo, snow cover, and temperature and presents models for predicting avalanche risk. The findings can be applied to avalanche safety management and slope monitoring in the context of a changing climate.

Keywords: Insolation; albedo; avalanche risk; slope aspect; snow cover; remote sensing; slope gradient; temperature processes.