Национальный исследовательский университет
Высшая школа экономики
Факультет географии и геоинформационных технологий

Пространственный анализ лавинной активности в регионе Гиссаро-Алая за 2015-2025 гг. по данным Sentinel-1

Докладчик: Кисляк Ульяна, магистрант 1 года обучения

Соавторы: доц., к. т. н. Подольская Екатерина Сергеевна,

вед. н. с., к. г. н. Глазовский Андрей Федорович

Москва, 2026

Актуальность темы

Фото с сайта mountain.ru

- Гиссаро-Алай относится к одним из наиболее лавиноопасных горных районов Центральной Азии, где лавины ежегодно создают угрозу населённым пунктам, транспортным коммуникациям и инфраструктуре (Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, 1997).
- При этом современная оценка лавинной активности на региональном уровне затруднена из-за фрагментарности наземных наблюдений и отсутствия систематического мониторинга. В условиях меняющегося климата необходимо актуализировать информацию о лавинной активности в исследуемом горном районе.
- Использование оптических снимков может быть затруднительным в связи с малой информативностью данных и их малым количеством. Методики дистанционного зондирования с использованием радиолокационных спутниковых данных открывают возможности для оценки лавинной активности на больших территориях.

Цель и задачи

Цель: оценка лавинной активности в Гиссаро-Алае за 2015 - 2025 гг. при помощи автоматизированного дешифрирования отложений лавинного снега по спутниковым данным Sentinel-1.

Задачи:

-анализ факторов лавинообразования в Гиссаро-Алае;

-автоматизация процесса обработки радарных данных и дешифрирования лавинных отложений при помощи методов машинного обучения в Google Earth Engine;

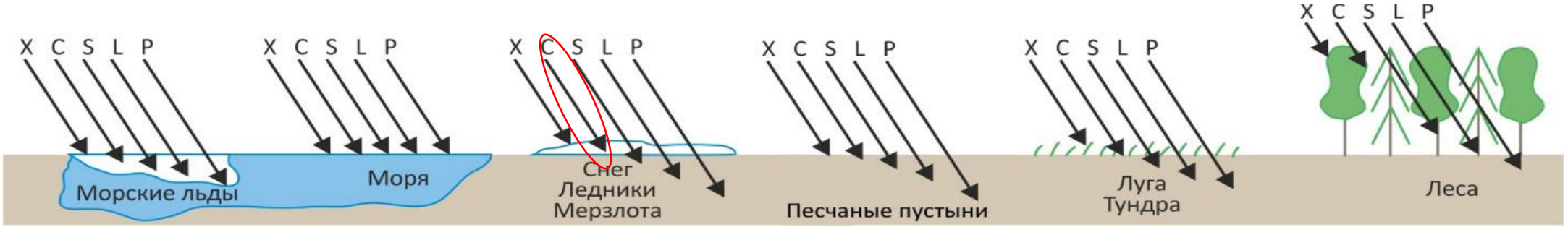
-расчет сезонной и интегральной частоты схода лавин в период с 2015 по 2025 гг.;

-анализ взаимосвязи лавинной активности и метеорологических параметров по данным реанализа ERA5-Land;

-подготовка тематических картографических материалов.

Принципы радиолокационной съемки

Радиолокационная съемка – съемка в радиодиапазоне, которая осуществляется радиолокатором - активным микроволновым датчиком, который способен излучать и принимать отражённые от земной поверхности поляризованные радиоволны в определённом диапазоне *(Балдина и др., 2017)*.

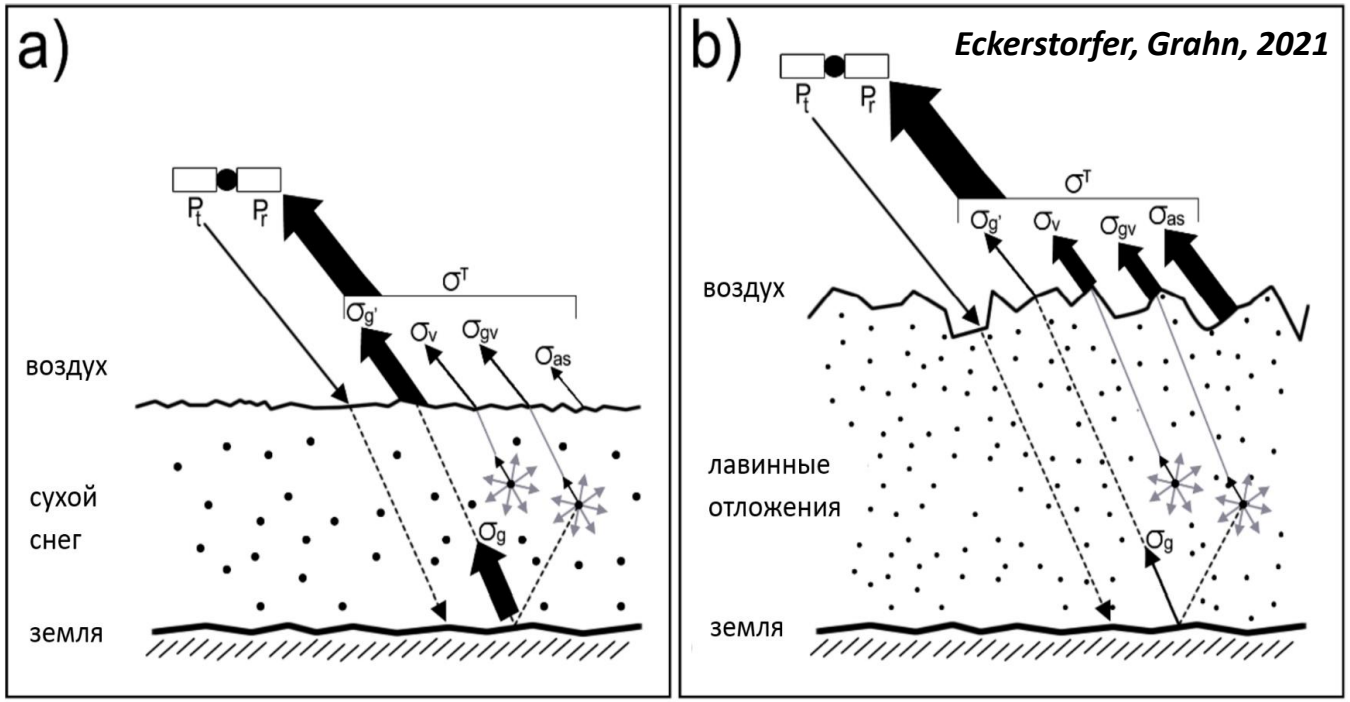


Проникающая способность радиоволн (Балдина и др., 2017)

Преимущества использования данных SAR Sentinel-1 для обнаружения лавин (Eckerstorfer, 2021)

Методика выявления лавинных отложений при помощи радиолокационных снимков

Лавинные отложения - масса снега, иногда с инородными включениями в виде камней, грунта, обломков кустов и деревьев, отлагающаяся на склоне и дне долины после остановки лавины (Гляциологический словарь, 1984)



Коэффициент обратного рассеяния - доля излучения, посланного радаром к поверхности Земли, возвращаемого обратно к антенне радара. Зависит от:

- шероховатости;
- угла съемки;
- влажность поверхности;
- характера рельефа и пр.

Коэффициент обратного рассеяния увеличивается:

свежевыпавший

слежавшийся снег

отложения сухих лавин

отложения мокрых лавин

$$\sigma^T = \frac{\sigma_g}{\sigma_{g'}} + \frac{\sigma_v}{\sigma_{gv}} + \sigma_{as}$$

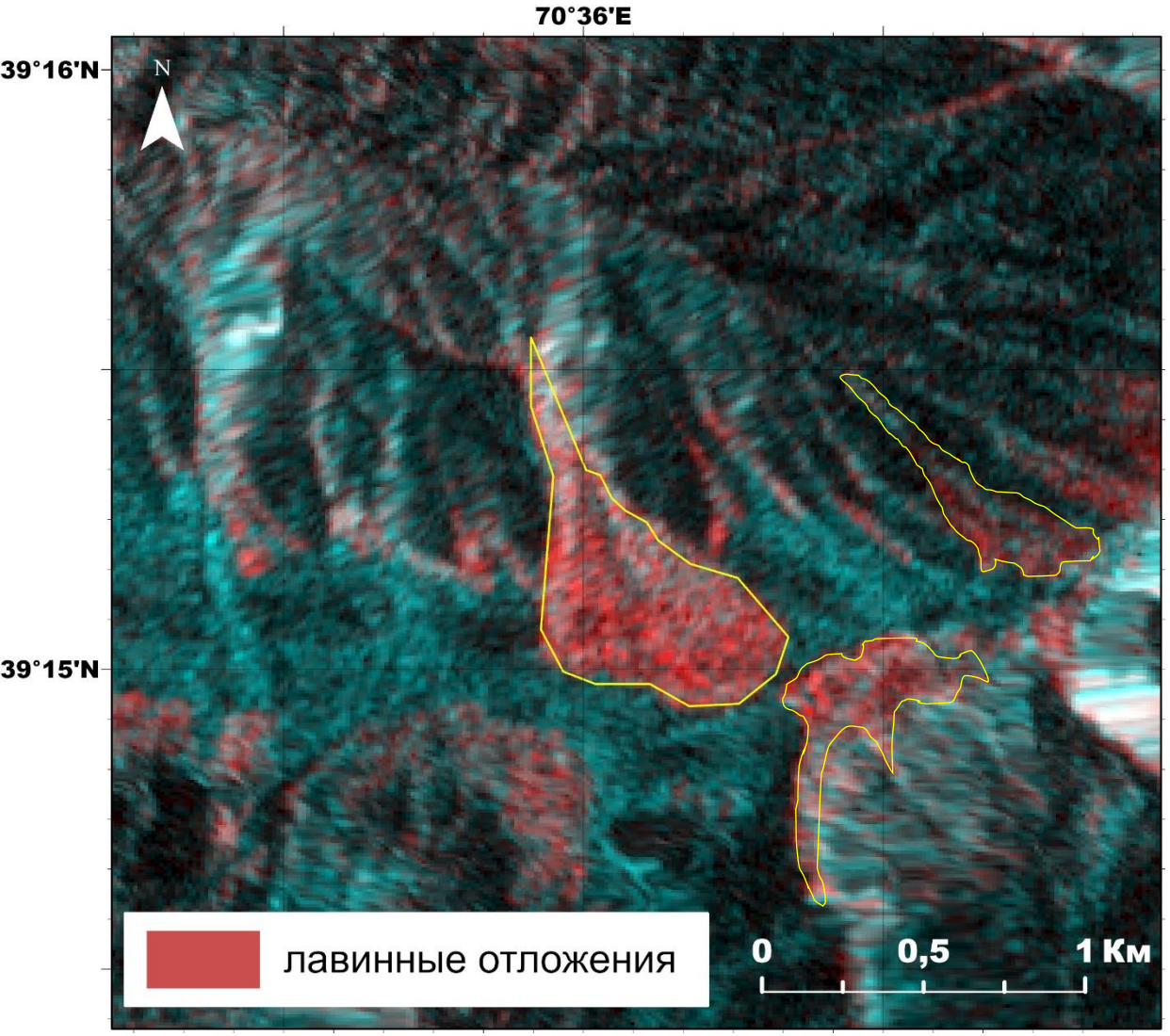
σ^T – наблюдаемый коэффициент обратного рассеяния; $\frac{\sigma_g}{\sigma_{g'}}$ – рассеяние поверхности земли

$\frac{\sigma_v}{\sigma_{gv}}$ – рассеяние объема снега; σ_{as} – рассеяние поверхности снег/воздух

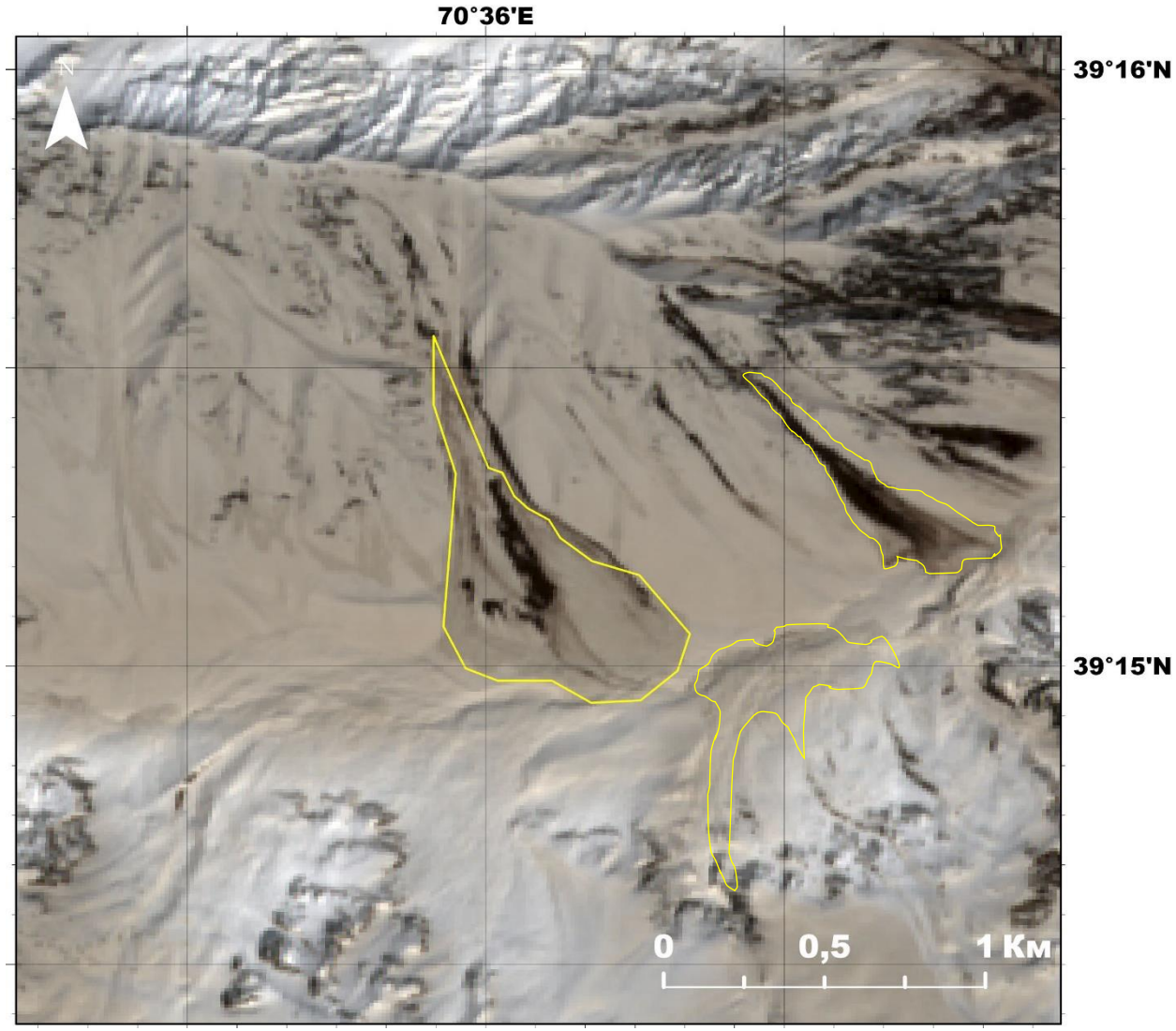
P_r – переданный

P_t – полученный

Дешифрирование лавинных отложений



Снимок Sentinel-1. R – 22 марта 2024 г.;
G, B – 3 марта 2024 г. (южный склон Гиссарского хребта)



Снимок Sentinel-2 от 2 апреля 2024 г.
(южный склон Гиссарского хребта)

Методика обработки радиолокационных снимков

1) Загрузка снимков
-ascending
-VV

→

2) Калибровка
σ0(dB) → γ0(linear)

→

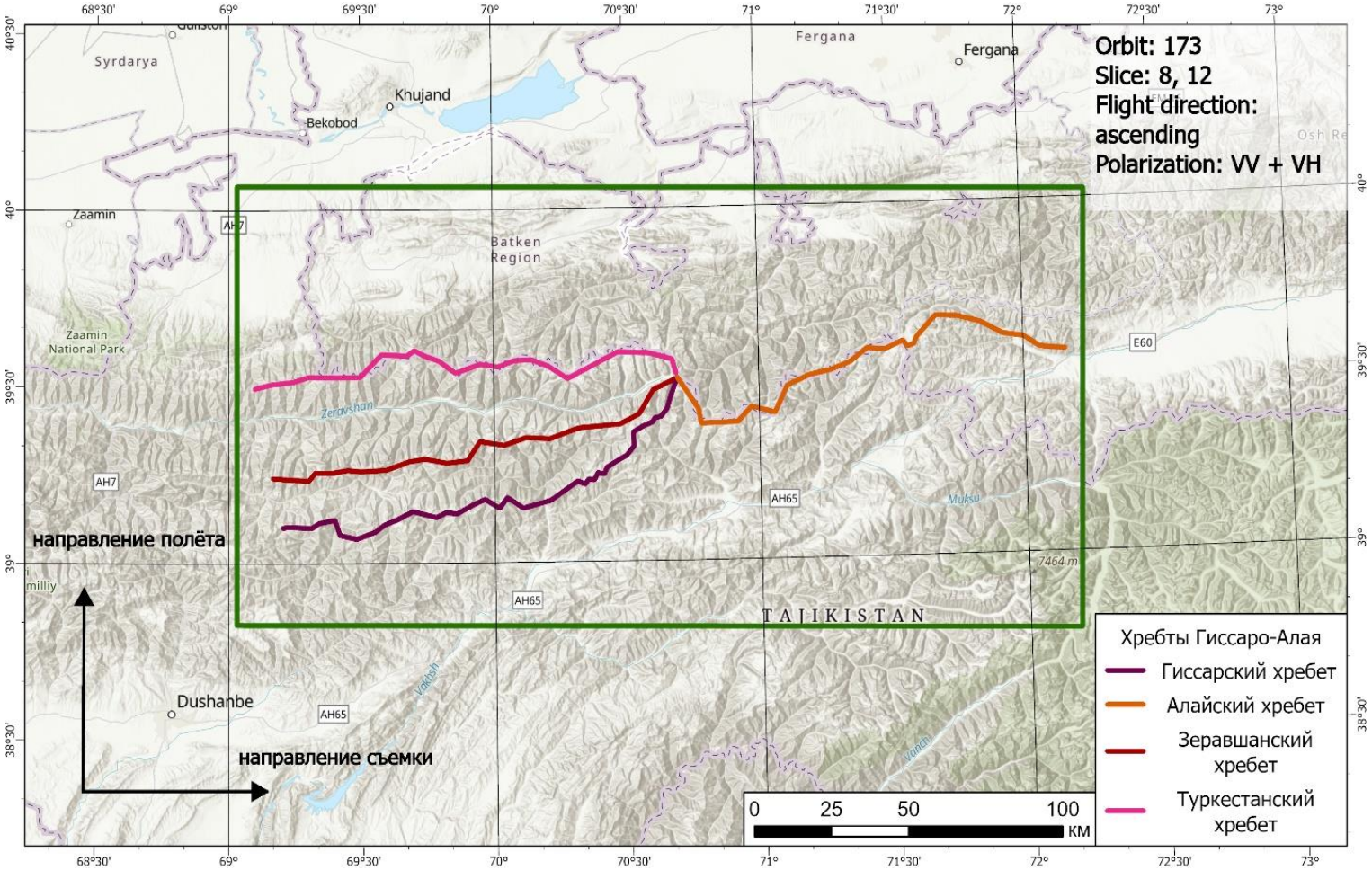
3) Геометрическая коррекция рельефа
SRTM / FABDEM / AW3D30

→

4) dB нормирование
γ0(linear) → dB
dB → [0;1]

→

5) Создание пар снимков

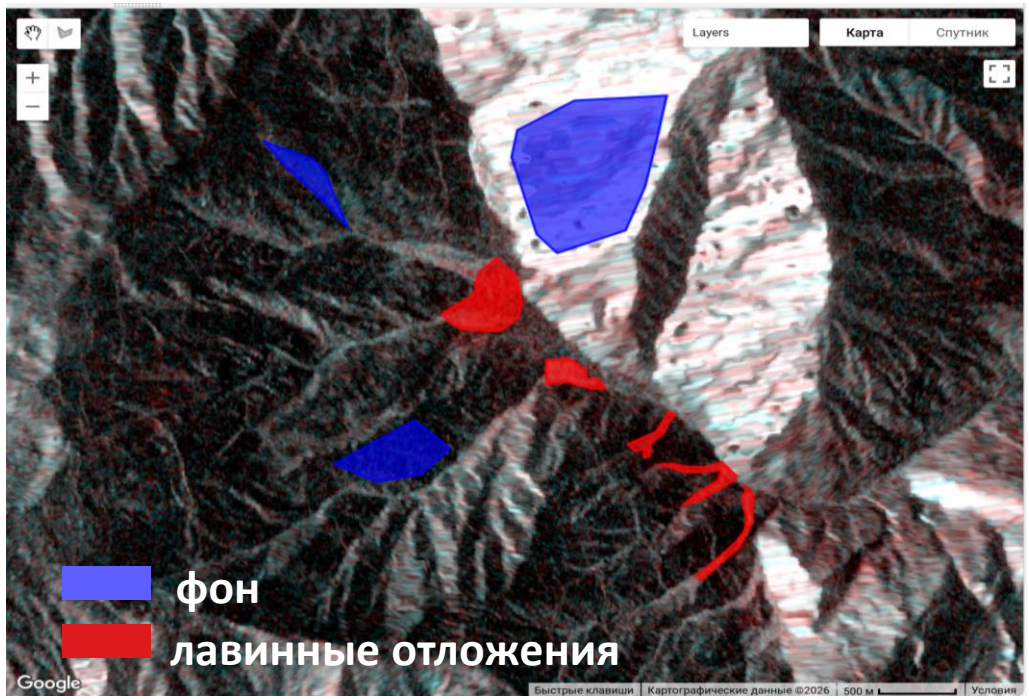


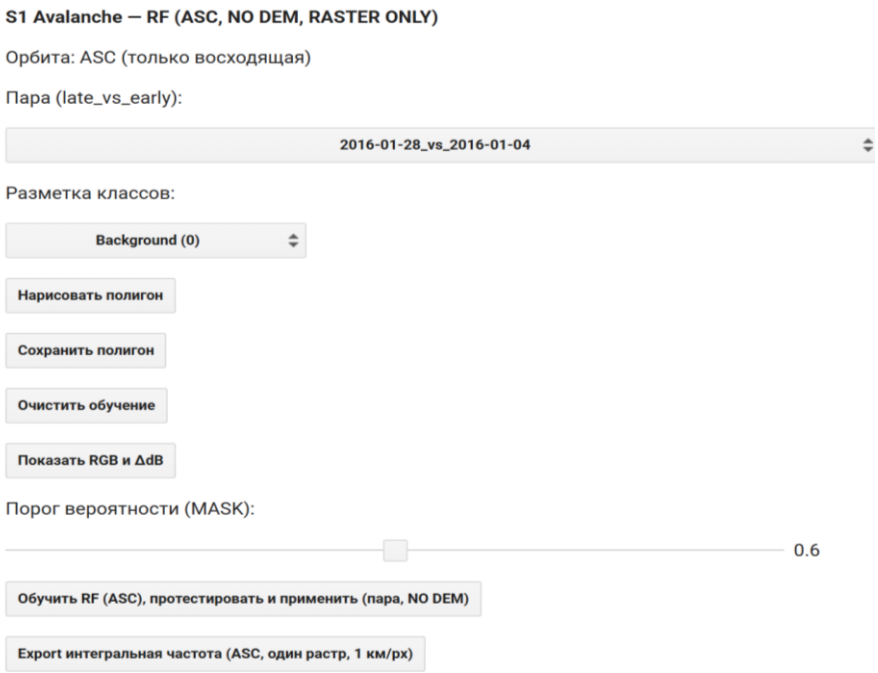
Использована облачная платформа для геопространственного анализа Google Earth Engine

185 снимков Sentinel-1 формата GRD за 24.10.2015 – 28.05.2025

254 снимка Sentinel-2

Создание обучающих выборок и классификация



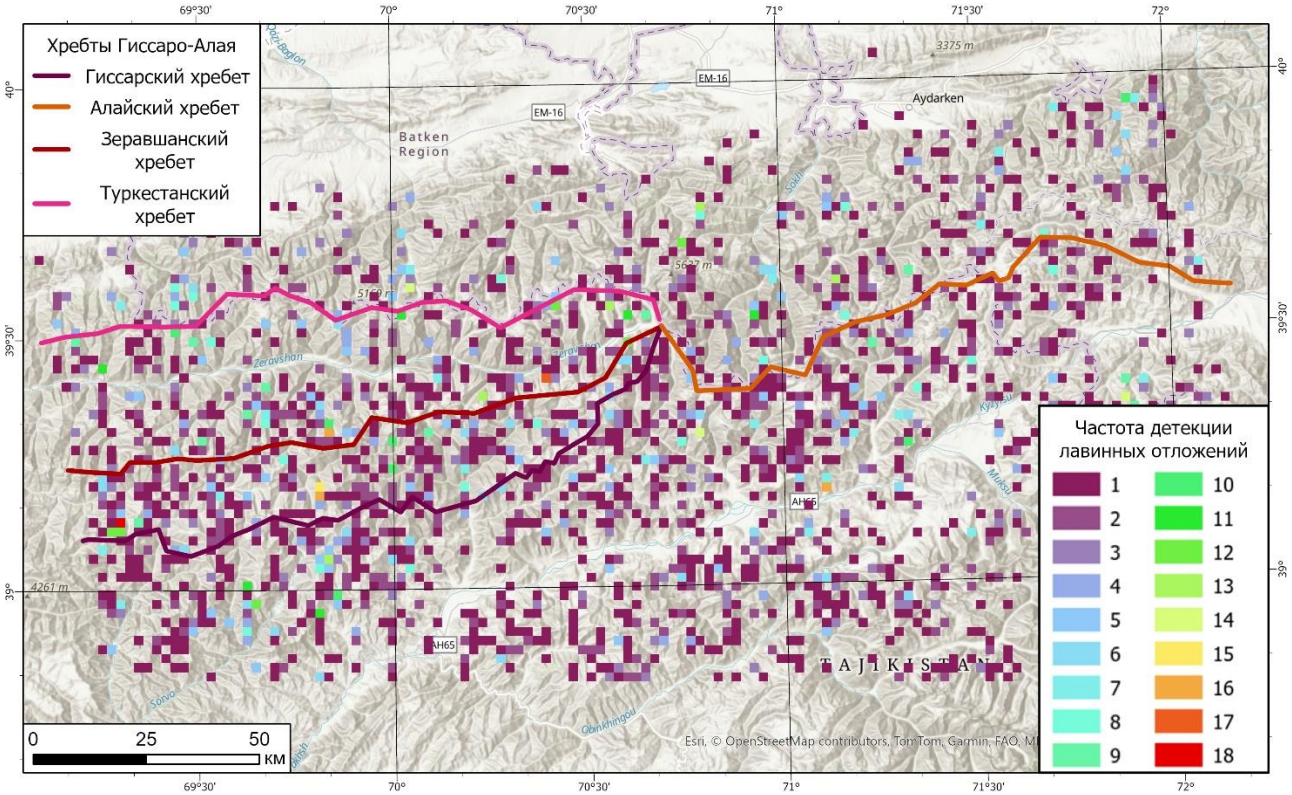


- Используемые данные:
  - обратное рассеяние (Sentinel-1),
  - индексы TPI и TRI, крутизна склона, кривизна в плане и в профиле, экспозиция (FABDEM)
- 2 класса: лавинные отложения и не лавинные отложения – отрисовка обучающих выборок вручную;
- Обучающая и тестовая выборки - 70/30;
- Классификация при помощи алгоритма Random Forest (400 деревьев);
- Precision = 0,98
- Recall = 0,92
- F1 = 0,95
- Вероятность принадлежности пиксела к классу -> порог 0,6 -> бинаризация масок лавинных отложений
- Растры с пространственным разрешением 2 км

Пространственный анализ лавинной активности в регионе Гиссаро-Алая за 2015-2025 гг.

Получена серия из 10 карт на каждый сезон с 2015 по 2025 гг., а также карта с частотой детекций лавинных отложений за все сезоны.

Распределение количества «лавинных» пикселей по сезонам с 2015 по 2025 гг. в Гиссаро-Алае



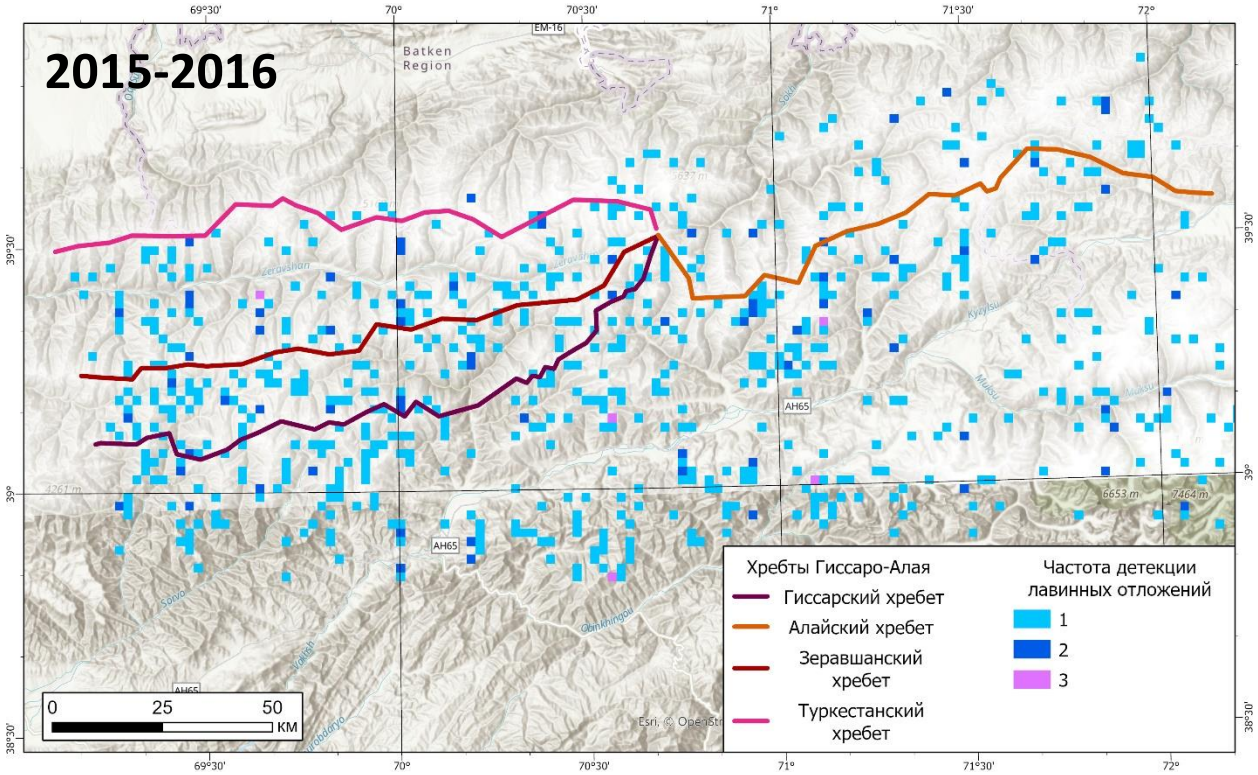
Лавинная активность в Гиссаро-Алае в 2015-2025 гг.

Пространственный анализ лавинной активности в регионе Гиссаро-Алая за 2015-2025 гг.

Рассчитан индекс лавинной активности для каждого сезона:

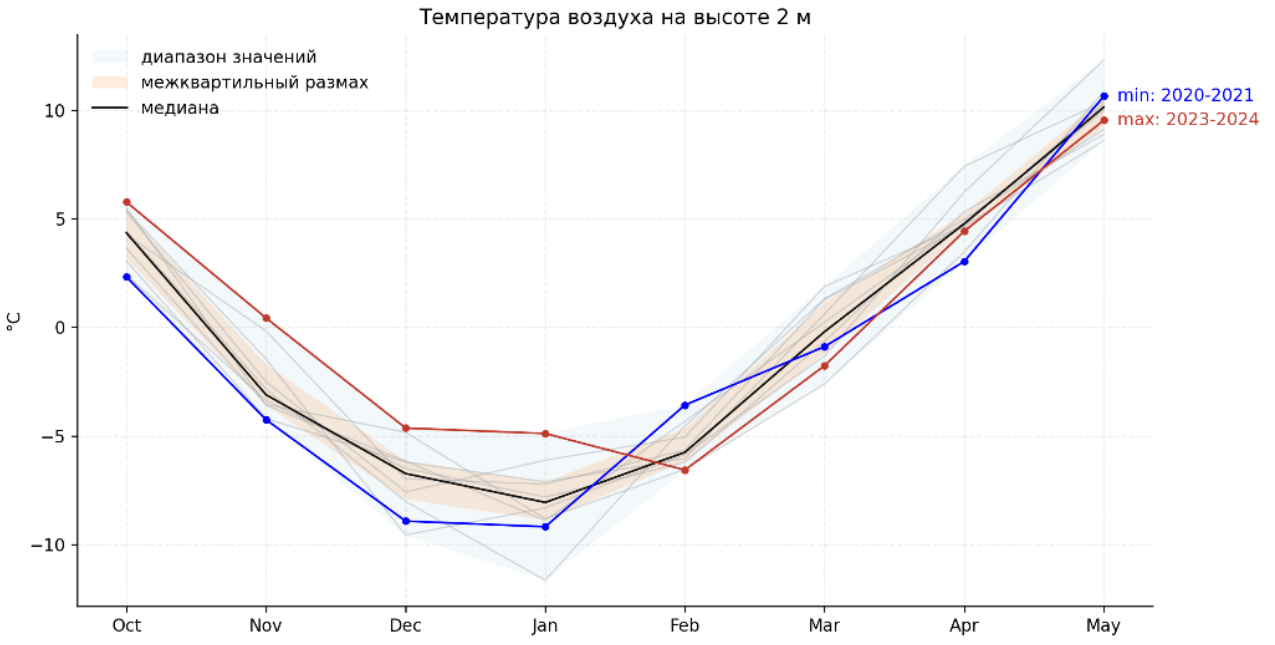
$$A_{norm} = \sum_i (F_i \cdot N_i) / N_{total} \cdot F_{max}$$

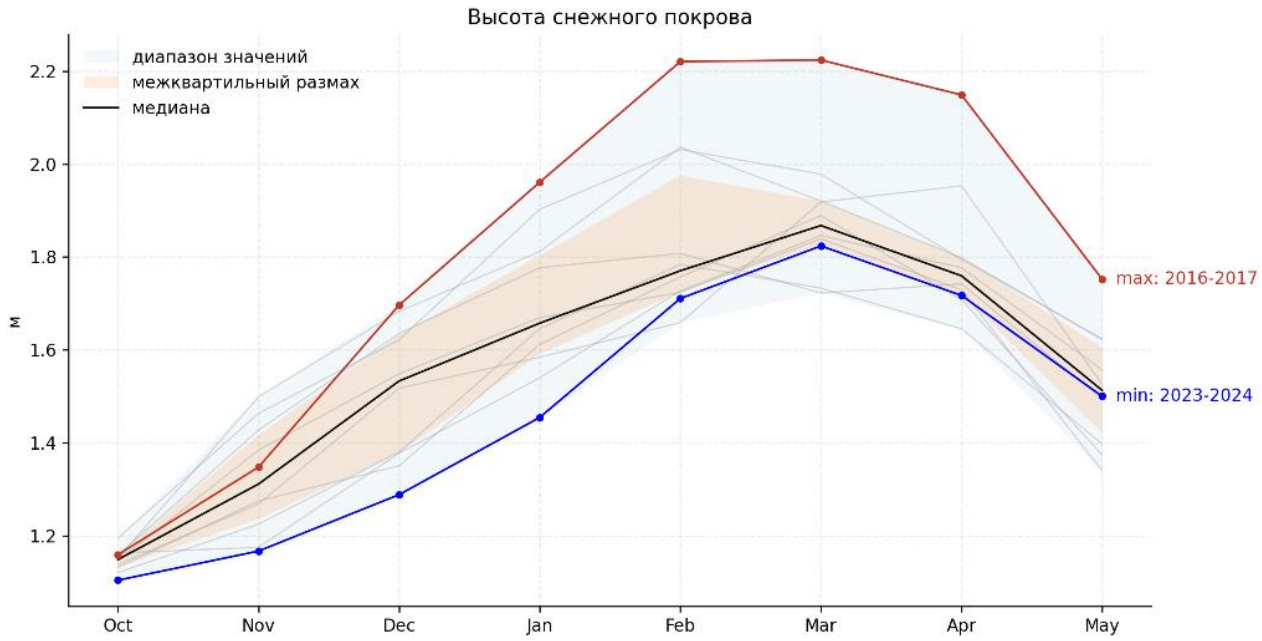
F_i - значение частоты детекции лавинных отложений в ячейке,
N_i - число ячеек с этим значением,
N_{total} - общее число ячеек,
F_{max}- максимальное количество детекций лавинных отложений в сезоне



Лавинная активность в Гиссаро-Алае в сезоне 2015-2016 гг.

Наибольший индекс лавинной активности в сезоне 2015-2016 гг. = 2,7 (фактическая лавинная активность в процентах (%) от максимально возможной, если бы вся территория была так же активна, как самый активный участок)



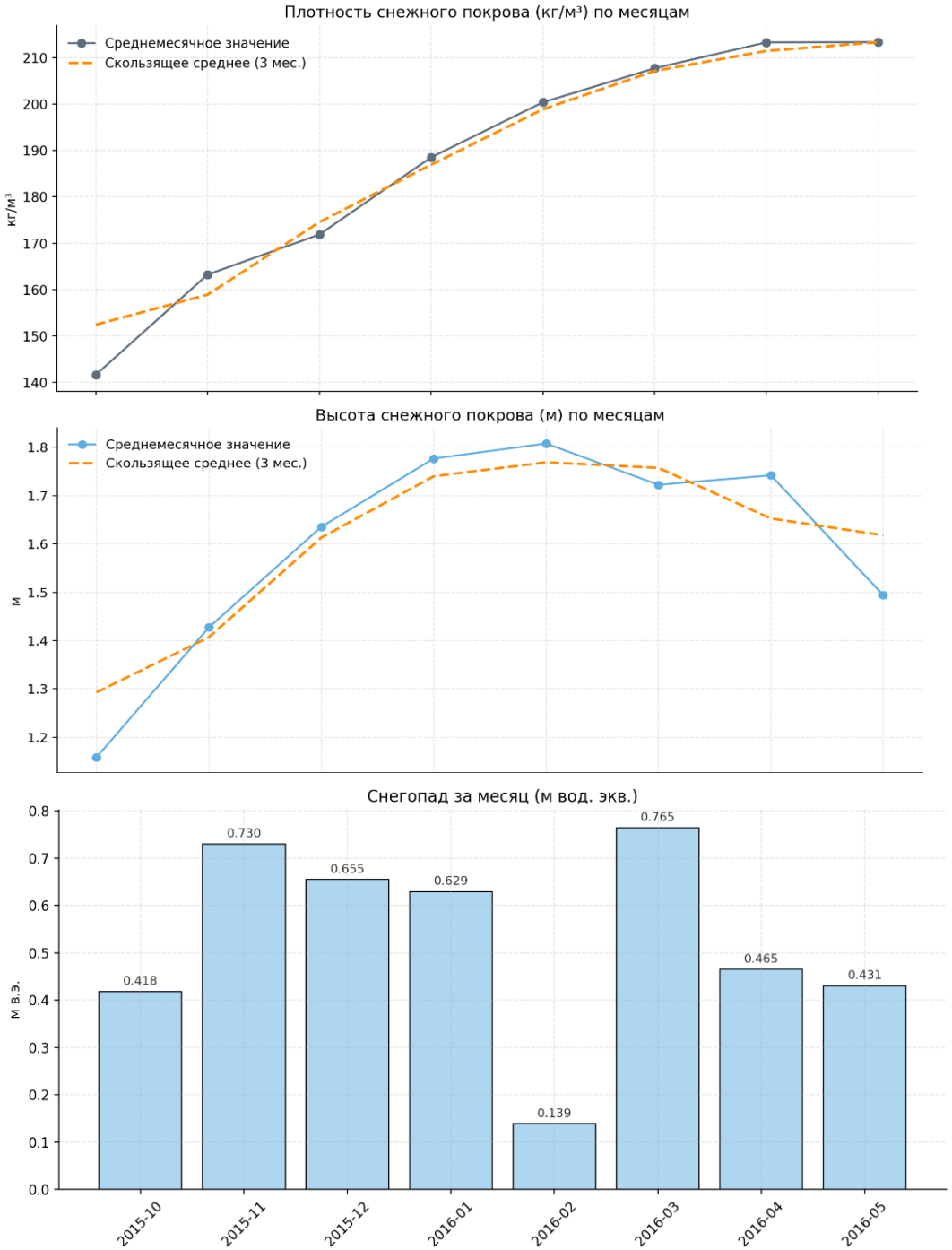


Метеорологическая обстановка в Гиссаро-Алае в 2015-2025 гг.

Данные реанализа ERA5-Land (каждые 3 часа):

- Температура воздуха на 2 м;
- Высота снежного покрова, м;
- Плотность снежного покрова, кг/м^3;
- Скорость ветра на высоте 10 м, м/с;
- Снегопады, м в.э.;
- Солнечная радиация на поверхности, Вт/м^2

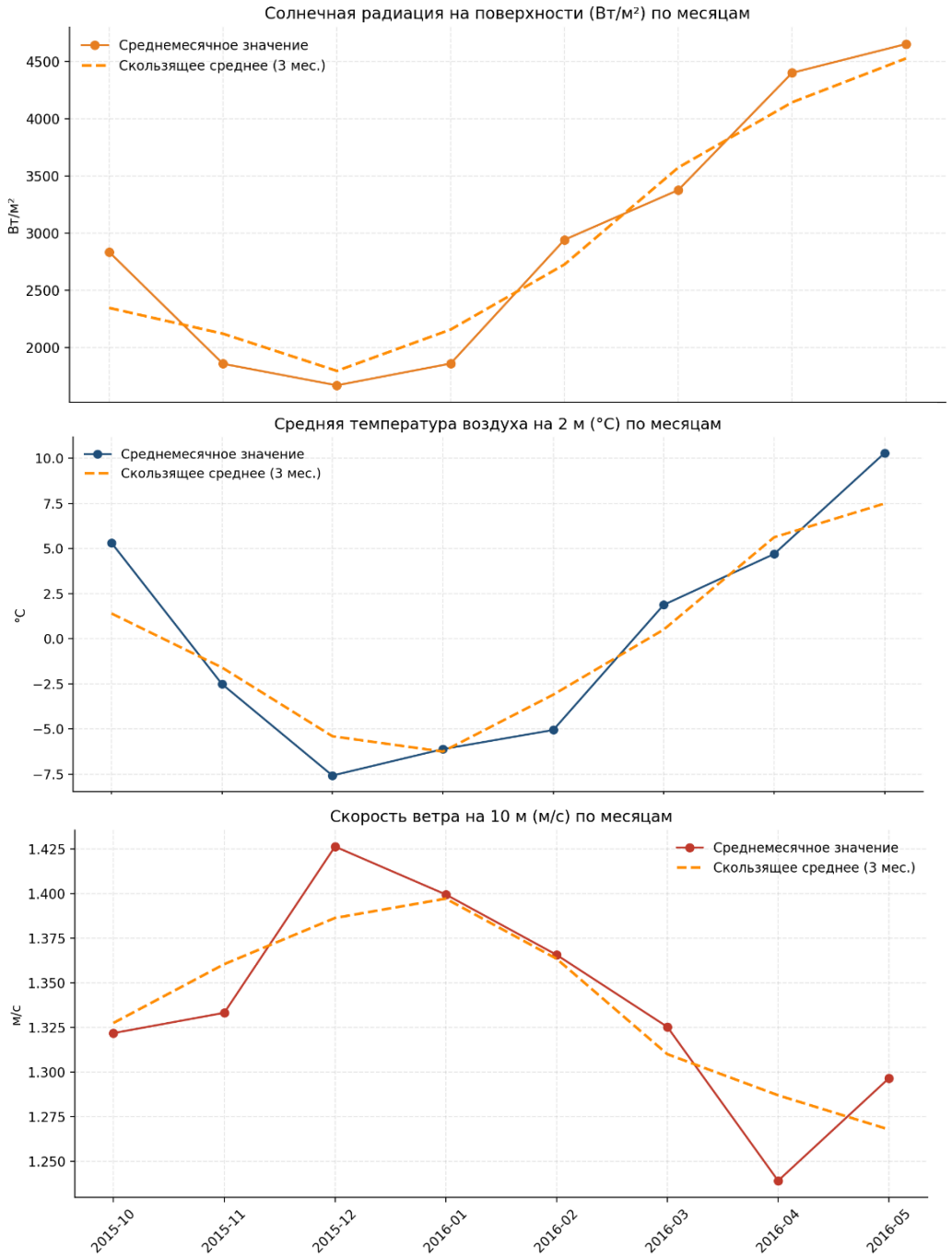
Общая метеорологическая обстановка в период с октября 2015 г. по май 2025 г. в Гиссаро-Алае



Метеорологические причины схода лавин в Гиссаро-Алае в сезоне 2015/16

Устойчивое увеличение высоты снежного покрова с октября по февраль с максимумом в конце зимы, интенсивные снегопады в начале сезона и весной при постепенном уплотнении снежного покрова.

Синоптическая ситуация в период с 01.10.2015 по 31.05.2016 на Гиссаро-Алае



Метеорологические причины схода лавин в Гиссаро-Алае в сезоне 2015/16

Весеннее потепление с активным снеготаянием, повышенная скорость ветра в начале зимы и в январе с ветровым уплотнением снега, интенсивный метаморфизм снега за счет усиления инсоляции.

Синоптическая ситуация в период с 01.10.2015 по 31.05.2016 на Гиссаро-Алае

Выводы

1. Проведен анализ факторов лавинообразования в Гиссаро-Алае, показавший, что высокая лавинная активность региона обусловлена сочетанием крутых склонов, значительного снегонакопления, продолжительного холодного периода и слабого развития древесной растительности, не препятствующей сходу лавин.

2. Разработана и реализована автоматизированная методика обработки радиолокационных данных Sentinel-1 и дешифрирования лавинных отложений в среде Google Earth Engine с использованием алгоритма машинного обучения Random Forest. Полученные показатели точности классификации (Precision - 0,98; Recall - 0,92; F1 - 0,95) подтверждают высокую надежность предложенного подхода для регионального мониторинга лавинной деятельности.

3. Выполнен расчет сезонной и интегральной частоты схода лавин в Гиссаро-Алае за период 2015–2025 гг. Установлено, что наибольшая лавинная активность наблюдалась в сезоне 2015–2016 гг., когда лавинные процессы охватили около 25 % территории региона, а интегральный индекс лавинной активности достиг значения 2.7, тогда как минимальная активность отмечена в сезонах 2020–2021 и 2022–2023 гг.

4. Анализ пространственного распределения лавин показал, что наибольшая доля детекций (около 40 %) приходится на склоны Зеравшанского хребта, тогда как минимальная — на Алайский хребет.

5. Сопоставление лавинной активности с данными реанализа ERA5-Land показало, что наиболее интенсивные проявления лавинных процессов формируются при сочетании значительного снегонакопления, увеличения высоты и плотности снежного покрова, ветрового перераспределения снега, устойчивых зимних морозов и последующего весеннего потепления на фоне роста солнечной радиации.

Спасибо за внимание!