

ИКИ РАН

Москва
2026

Крупномасштабное картографирование наземного покрова Гегамского хребта с использованием инструментов машинного обучения для классификации вулканических отложений

Пономарева Анастасия

НИУ ВШЭ, Факультет географии и геоинформационных технологий,
Институт географии РАН, Центр природно-антропогенных геосистем

Научный руководитель: Медведев Андрей Александрович
зав. отделом картографии и дистанционного зондирования Земли, Институт географии РАН, к.г.н.

Актуальность

Проблема: отсутствие крупномасштабных тематических карт типов наземного покрова

Текущие ограничения:

- исследования ведутся только в региональном масштабе
- используются методы визуального дешифрирования
- низкое пространственное разрешение данных

Новизна:

- переход от качественного геологического анализа к количественному; автоматизированному картографированию;
- интеграция данных нескольких спутниковых платформ с методами машинного обучения.



Гегамское вулканическое нагорье (Армения):

- Расположено в центральной части Армении, между озером Севан и Араратской равниной.
- Это **центральная вулканическая область Армянского нагорья с 128 моногенными вулканами** плейстоцен-голоценового возраста.
- Плотность вулканических центров составляет около **1 на 18 км²**.
- Нагорье вытянуто в направлении **СЗ-ЮВ на 65 км**.
- Максимальная высота **3597 м** — это вулкан **Аждаак**.

Вулканические образования Гегамского нагорья (выше 2300 метров НУМ) AW3D

Типы образований

- Вулканы гегамского типа
- ☆ Купола
- Лавовые конусы
- Простые шлаковые конусы
- ✱ Сложные шлаковые конусы
- Главные направления движения лав

1 — Армаган (Магмаган, Абдуласар, Агмаган)

2 — Джар-тар

3 — Таваблур

4 — Малый Джар-тар

5 — Ваграмасар

6 — Парваглук

7 — Вочкаратумб

8 — Гекасар (Малый Аг-даг)

9 — Ераноский

10 — Малый Ераноский

11 — Еракатар (Уч-тапа)

12 — Вишапасар (Зиарет)

13 — Цакарнер

14 — Конус «а»

15 — Спиткасар (Большой Аг-даг)

16 — Малый Пич

17 — Пич

18 — Назели (Назал-тапа)

19 — Тар

20 — Камурч

21 — Аждаак (Кызылджид-даг)

22 — Западный Агусар

23 — Сваккасар

24 — Месропсар

25 — Налкасар (Нал-тапа)

26 — Темаблур (Уч-тапа)

27 — Южный Агусар

28 — Агусар (Агу-даг)

29 — Ваганасар

30 — Пахалапан (Караул-тепе)

31 — Авер

32 — М. Пахалапан

33 — Гегмаган (Кызыл-Зиарет)

34 — Лаван

35 — Парос

36 — Акноцасар (Уч-тапа)

37 — Акноцасар (Уч-тапа)

38 — Куйт

39 — Арцруни

40 — Маракхалапат (Морохлу-тапа)

41 — Лодочникова

42 — Севкатар (Карадаг, Севсар)

43 — Ю. Тамк

44 — С. Тамк (Имдин-дуган)

45 — Кармратумб (Кырмизи-тапа)

46 — Мазаз (Кызыл-даг, Кармирсар)

47 — Конд

48 — Тас

49 — Варданасар

50 — М. Варданасар

51 — Матан

52 — Ю. Акор

53 — Акор

54 — С. Акор

55 — М. Цуглук

56 — Цуглук

57 — Српсар

58 — Сенасар

59 — Гамбаряна (Уч-тапа)

60 — Асегасар

61 — Мохраглук

62 — Демехина

63 — Джанасар (Джан-тапа)

64 — Каралетяна (Уч-тапа)

65 — Конус «а»

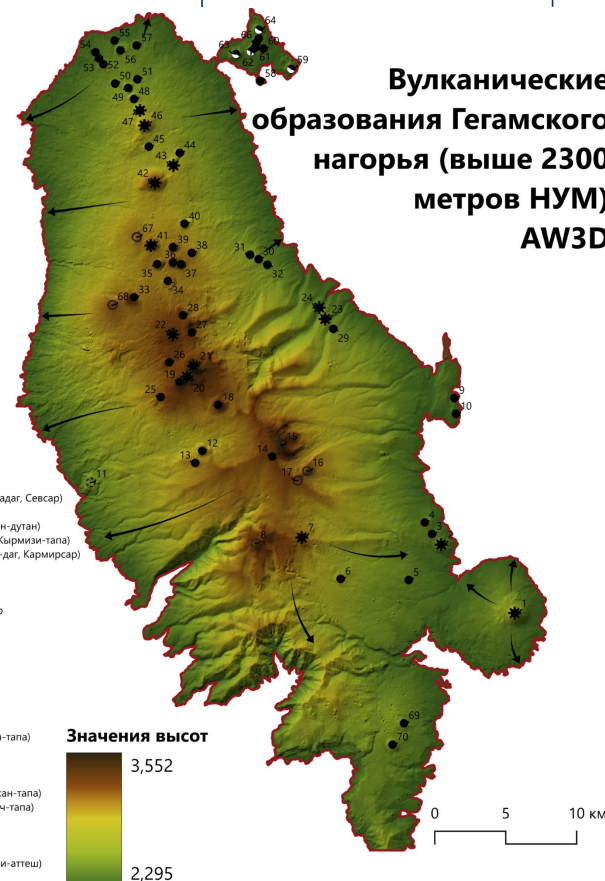
66 — Конус «б»

67 — Парос

68 — Сеган (Зейнари-аттеш)

69 —

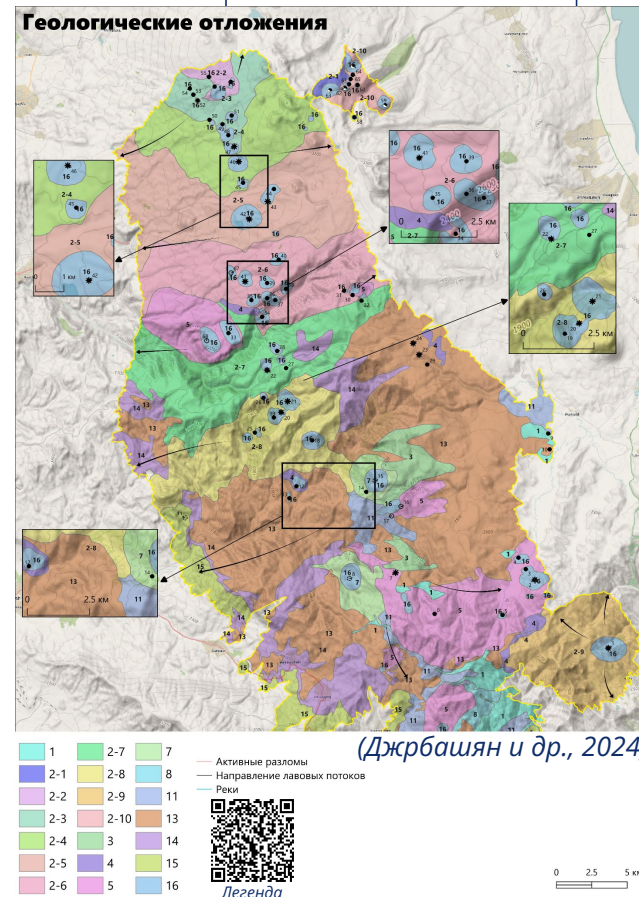
70 —



Особенности исследуемой территории

Геология и вулканизм:

- Преобладают базальтовые трахиандезиты и трахиандезиты.
- Вулканические купола сложены более кислыми породами — **риолитами и дацитами**, с которыми связаны проявления **обсидианов и перлитов**.
- Для лавовых потоков характерны **глыбовые лавы чингильного типа**.
- Распространены пирокластические образования: **шлаки, вулканические бомбы и обломочный материал**, влияющие на формирование шлаковых конусов и покровов.
- Для Гегамского нагорья типичны **стромболианский и вулканский типы извержений**.



Цель и задачи

Цель:

Разработать и апробировать автоматизированную методику классификации наземного покрова и вулканических отложений для крупномасштабного тематического картографирования (**1:75'000**).

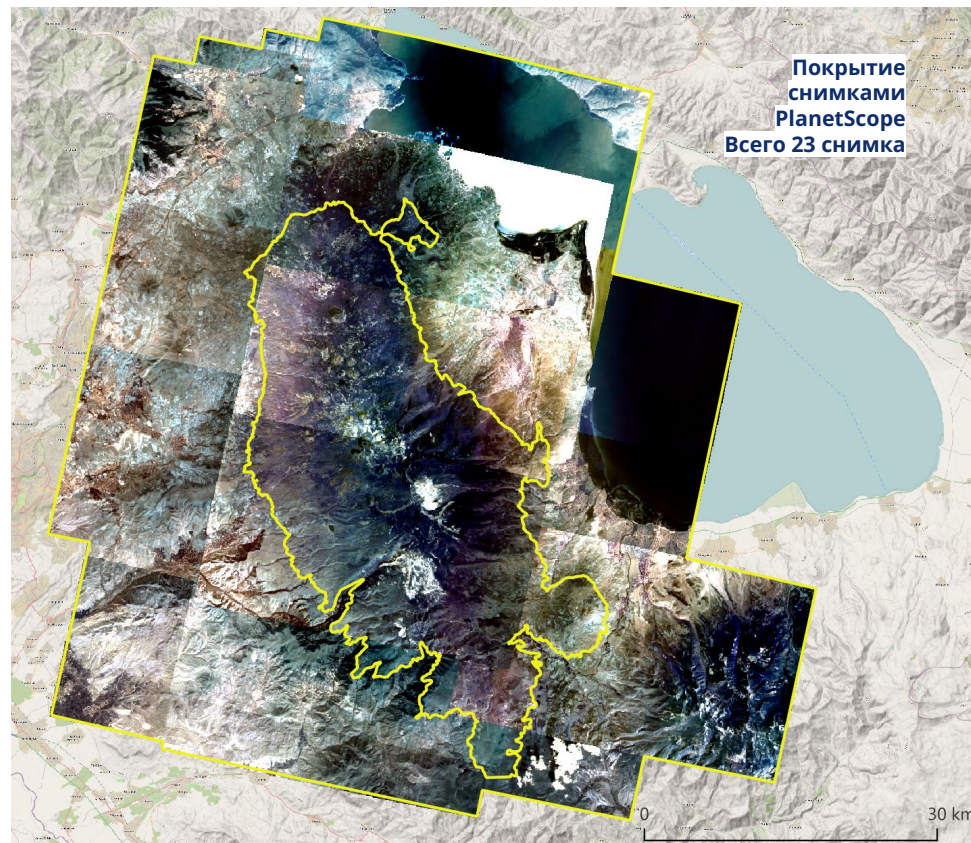


Задачи:

- Проанализировать геолого-геоморфологические особенности Гегамского нагорья, структуру вулканических центров и лавовых полей.
- Охарактеризовать исходные данные ДЗЗ и оценить возможности снимков **Sentinel-2, PlanetScope, Ресурс-П** и **ЦМР** для картографирования вулканических территорий.
- Разработать автоматизированную методику классификации наземного покрова и вулканических отложений для крупномасштабного картографирования **1:75 000**.
- Выделить структурные элементы рельефа по данным ЦМР и Ресурс-П и сопоставить их с геологическими картами исследуемого района.
- Выполнить валидацию результатов классификации по геологическим картам и полевым данным.
- Создать **итоговые тематические карты** наземного покрова и вулканических отложений и оценить возможность применения методики для других вулканических районов.

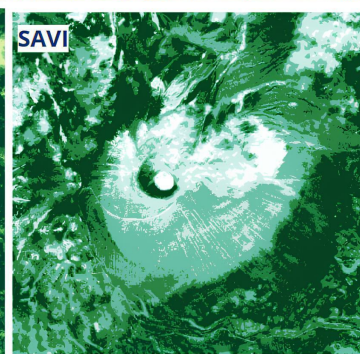
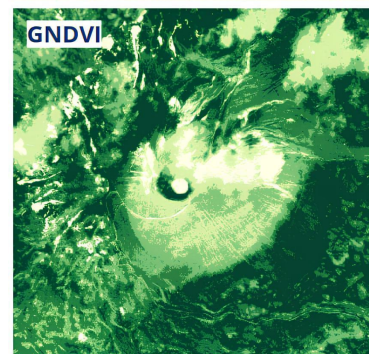
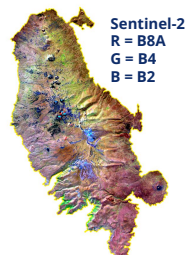
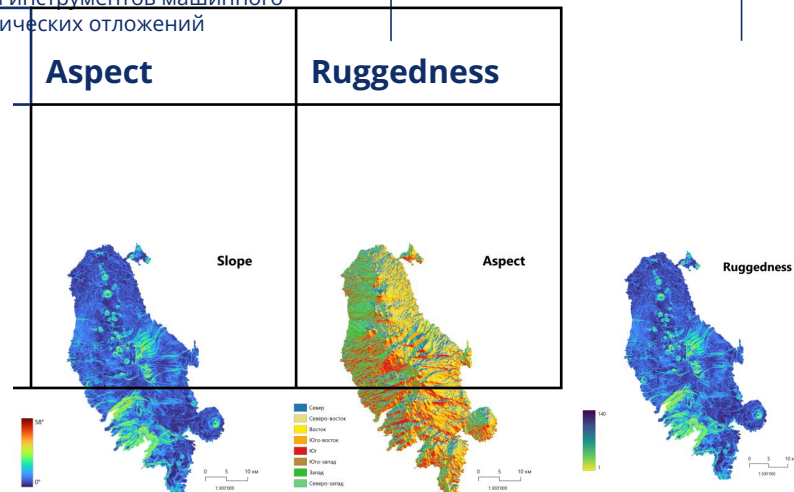
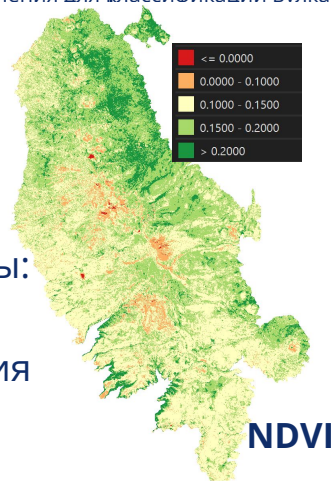
Исходные данные:

- **PlanetScope SuperDove** — мультиспектральные данные с пространственным разрешением **3 м** и **8 каналами**: coastal blue 431–452 нм, blue 465–515 нм, green I 513–549 нм, green 547–583 нм, yellow 600–620 нм, red 650–680 нм, red edge 697–713 нм, NIR 845–885 нм.
- **Sentinel-2 MSI** — мультиспектральные данные с **13 каналами** в диапазоне от 442.3 до 2202.4 нм и пространственным разрешением **20 м**.
- **Ресурс-П** — панхроматические данные сверхвысокого пространственного разрешения **0.7 м**.
- **AW3D DEM** — цифровая модель рельефа с пространственным разрешением **24 м**.
- **Данные полевых исследований.**



Производные данные:

- Спектральные индексы: NDVI, SAVI, NDWI, NDBI, Rock Index, Iron Oxide Index
- Морфометрические параметры: slope, aspect, ruggedness
- Синтезированные изображения Sentinel-2: SWIR2-NIR-Red, SWIR2-SWIR1-RedEdge и т.п.
- **Всего:**
 - 15 индексных изображений
 - морфометрические параметры
 - синтезированные изображения

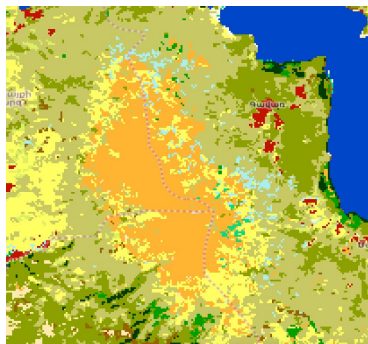
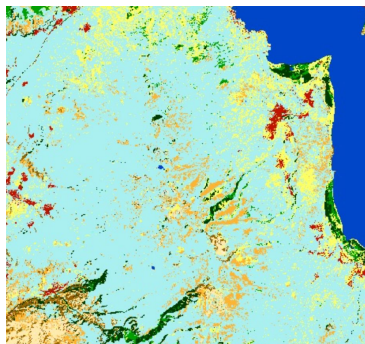
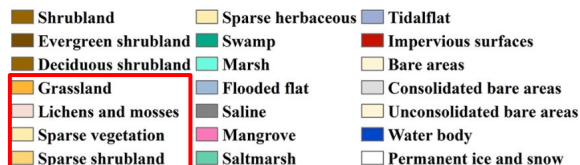
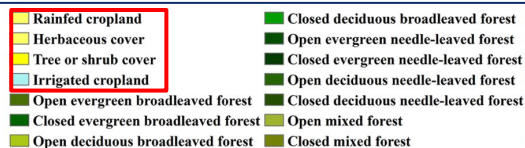
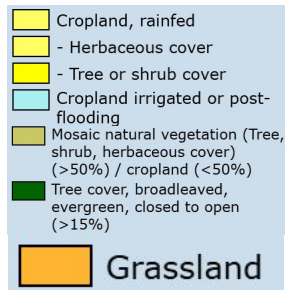
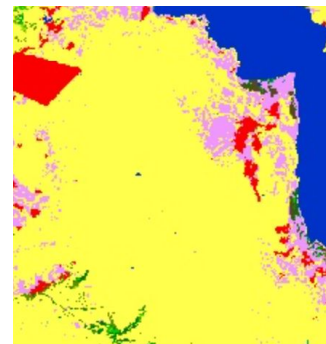




Существующие классификации наземного покрова

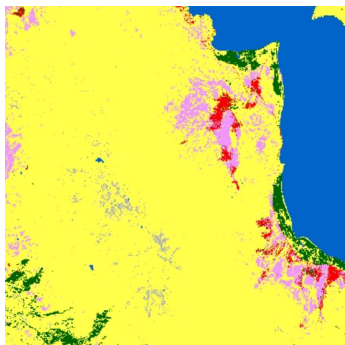
Класс	Описание	Ближайшие аналоги в глобальных схемах	LCCS (Land Cover Classification System)
1–4	Открытые вулканические и обломочные поверхности	CORINE: 331–333, 332 Bare rocks, 333 Sparsely vegetated; ESA CCI: 200 Bare areas; GLC_FCS30D: 201 Consolidated, 202 Unconsolidated bare areas; CGLS: Bare/sparse vegetation + fractional cover	Детализированы как отдельные классы bare areas: свежие лавы, выветрелые поверхности, рыхлые отложения, глыбовые лавы/осыпи
5–6	Растительность	CORINE: 321 Natural grasslands, 322 Moors and heathland, 323 Sclerophyllous vegetation, 333 Sparsely vegetated; ESA CCI: 120 Shrubland, 130 Grassland, 150–153 Sparse vegetation; GLC_FCS30D: 120 Shrubland, 130 Herbaceous cover, 150–153 Sparse herbaceous/shrub	Sparse vegetation; Herbaceous/shrub vegetation с разделением по степени проективного покрытия
7	Вода	CORINE: 511 Water courses, 512 Water bodies; ESA CCI / GLC_FCS30D: 210 Water body; CGLS: Permanent water bodies	Water bodies
8	Снег и лед	CORINE: 335 Glaciers and perpetual snow; ESA CCI: 220 Permanent snow and ice; GLC_FCS30D: 220 Permanent ice and snow; CGLS: Permanent snow and ice	Snow and ice
9–10	Скальные и склоновые отложения	CORINE: 332 Bare rocks; ESA CCI: 200 Bare areas; GLC_FCS30D: 201 Consolidated, 202 Unconsolidated bare areas; CGLS: Bare/sparse vegetation + fractional cover	Отдельные классы bedrock / mixed rock outcrops и colluvial-talus deposits

**классификация CORINE не распространяется на территорию Армении*

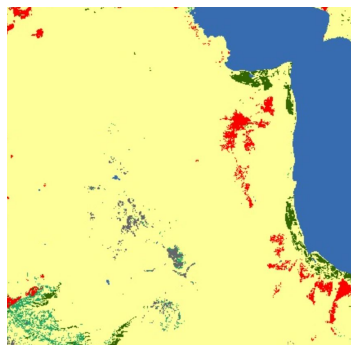
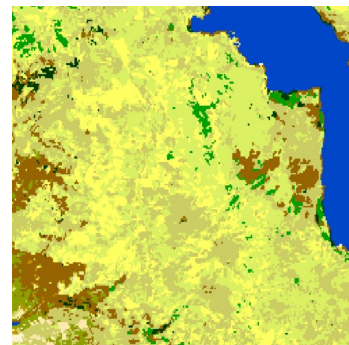
ESA Climate Change Initiative
(300 м)Global 30-m land-cover dynamic
monitoring (30 м)Copernicus Global Land Cover
Layers: CGLS-LC100 (100 м)

#ffff4c

Травянистая растительность. Растительность без сохранившихся надземных стеблей или побегов и без четко выраженной твердой структуры. Покрытие деревьями и кустарниками составляет менее 10%.

ESA WorldCover 10m v200
(10 м)*

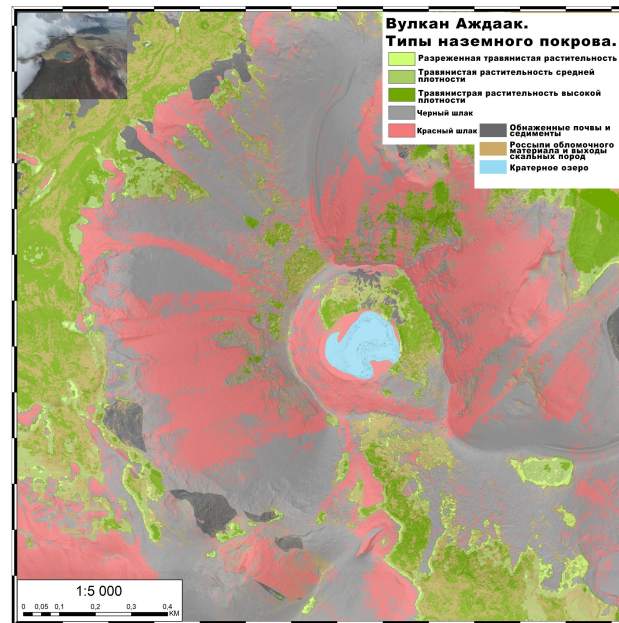
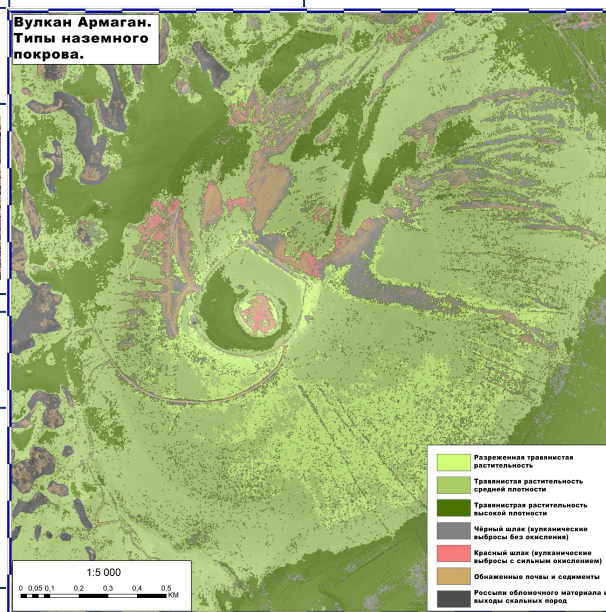
*на основе данных Sentinel-2

Global Land Cover Estimation
(GLanCE) (30 м)GlobCover Global Land Cover
(300 м)

#000000	древесный покров
#ffbb22	Кустарниковая местность
#ffff4c	Луга
#f096ff	Пахотная земля
#fa0000	Застроенный
#b4b4b4	Голая/редкая растительность
#f0f0f0	Снег и лед
#0064ac	Постоянные водоемы
#0096a0	Травянистые заболоченные участки
#00c175	Мангровые леса
#fae6a0	Мох и лишайник



#ffff63	богарные пахотные земли
#dcef63	Мозаичные пахотные земли (50-70%) / растительность (луга, кустарники, леса) (20-50%)
#dcd664	Мозаичная растительность (луга, кустарники, леса) (50-70%) / пахотные земли (20-50%)
#000000	Сомкнутый или разреженный (>15%) широколиственный вечнозеленый и/или полулиственный лес (>5 м)
#000000	Сплошной (>40%) широколиственный лиственный лес (>5 м)
#a6c700	Открытый (15-40%) широколиственный лиственный лес (>5 м)
#000000	Сплошной (>40%) вечнозеленый хвойный лес (>5 м)
#000000	Открытый (15-40%) лиственный или вечнозеленый лес с хвойными листьями (>5 м)
#78b300	Смешанный широколиственный и хвойный лес (>5 м), от закрытого до открытого (>15%) типа.
#009100	Мозаичный лесостепной (50-70%) / луга (20-50%)
#b09500	Мозаичные луга (50-70%) / лесостепные заросли (20-50%)
#950300	Заросли кустарника (менее 5 м), от закрытых до открытых (>15%)



Наземный покров

Предварительная обработка данных: атмосферная и радиометрическая коррекция, перепроецирование в UTM зона 38N / WGS84.

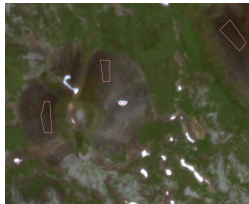
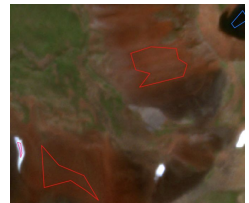
Расчет признаков: спектральные индексы и морфометрические параметры.

Обучающая выборка: 10 классов по LCCS, не менее 10 полигонов на класс, до 20 000 пикселей на класс.

Алгоритмы классификации: Random Forest и CatBoost.

Тестируемые сценарии:

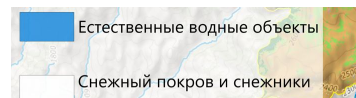
- PlanetScope + ЦМР ✓ (выбранный вариант);
- Sentinel-2 + ЦМР;
- PlanetScope + Sentinel-2 + ЦМР.

Класс	Отобр. на снимке	Фотография
Открытые почвы и породы: вулканический, возраст: современный, выветривание: минимальное		
Открытые почвы + выветривание: умеренное-высокое, окисление: выраженное		
Естественная растительность + покрытие: разреженное (10–20%), форма: травянистая/кус тарниковая		

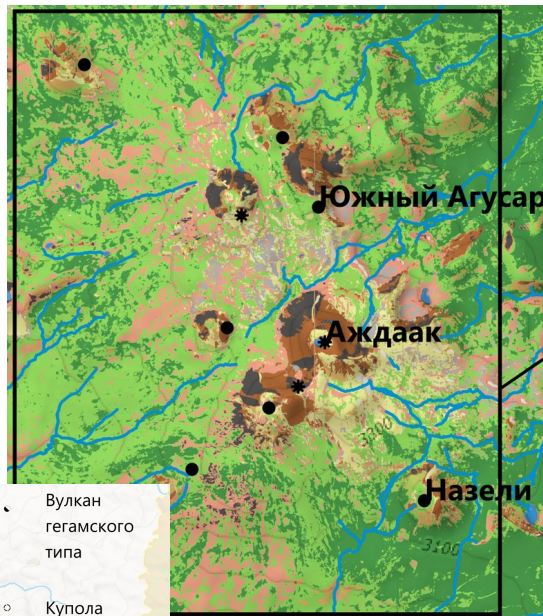
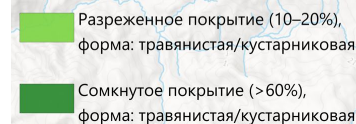
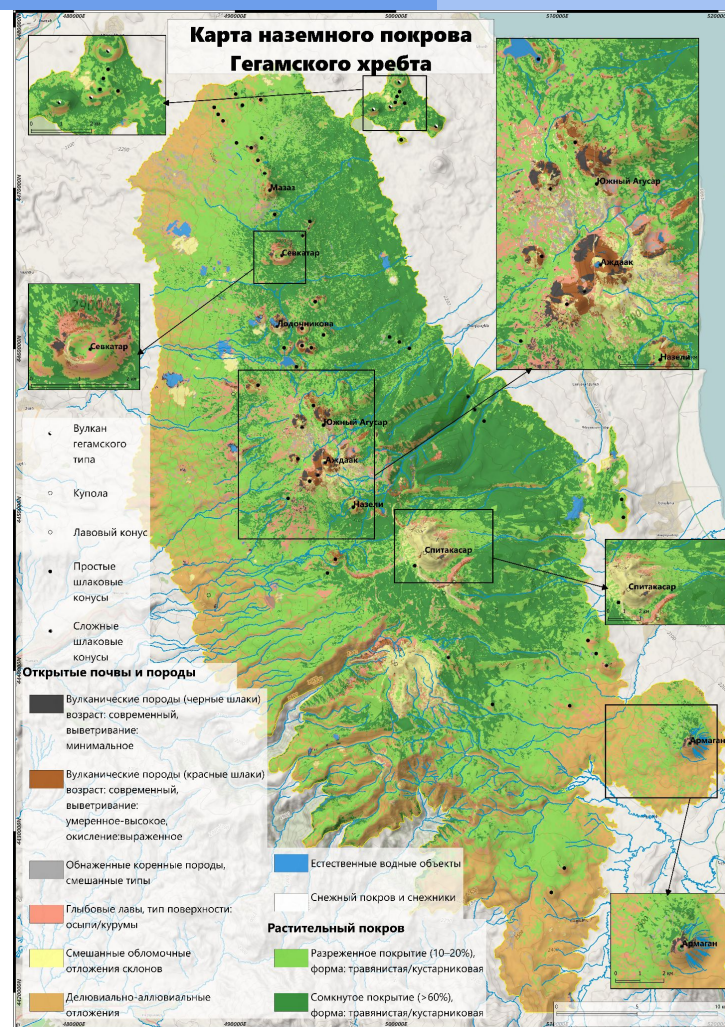
Данные полевых исследований

	Открытые почвы и породы: вулканический, возраст: современный, выветривание: минимальное	Открытые почвы + выветривание: умеренное-высокое, окисление: выраженное	Открытые почвы и породы: делювиально-аллювиальные отложения	Открытые почвы и породы: глыбовые лавы, тип поверхности: осыпи/курумы	Естественная растительность + покрытие: разреженное (10–20%), форма: травянистая/кустарниковая	Естественная растительность + покрытие: сложное (>60%), форма: травянистая/кустарниковая	Естественные водные объекты	Снежный покров и снежники	Открытые почвы и породы: обнаженные коренные породы, смешанные типы	Открытые почвы и породы: смешанные обломочные отложения склонов
Planet Scope										
Sentinel-2										
Ресурс-П			-	-	-	-			-	-
AW3D										

Открытые почвы и породы



Растительный покров

Карта наземного покрова
Гегамского хребта

Результаты классификации наземного покрова

В половине классов значение F1 выше 0.9. Еще 4 класса имеют значение около 0.8.

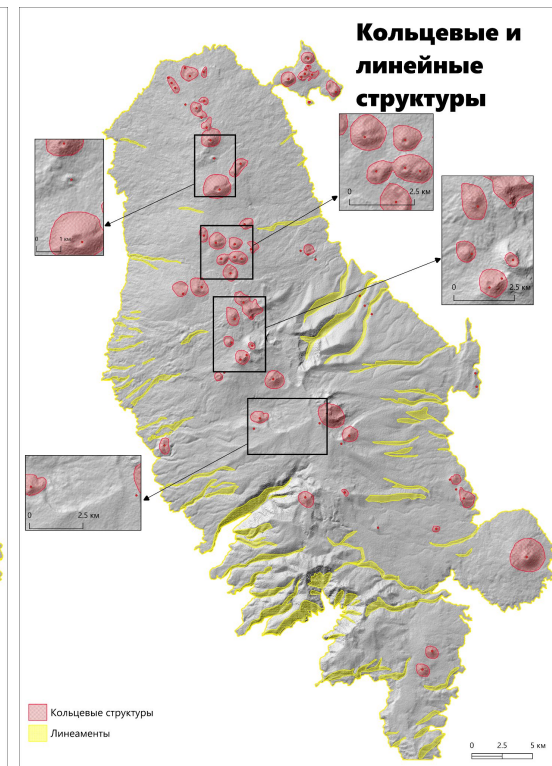
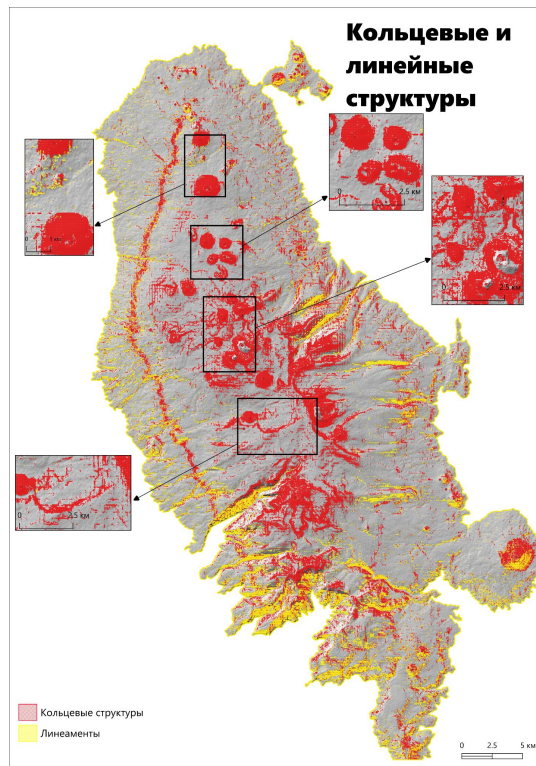
- **Recall (Полнота)** – доля правильно найденных пикселей класса от их реального числа.
- **Precision (Точность)** – доля верно классифицированных пикселей среди всех, отнесенных моделью к этому классу.
- **F1-score (F1-мера)** – среднее между precision и recall, мера качества по классу.

Класс	Precision	Recall	F1
Открытые почвы и породы: вулканический, возраст: современный, выветривание: минимальное	0.99	0.57	0.72
Открытые почвы + выветривание: умеренное-высокое, окисление: выраженное	0.67	1.00	0.80
Открытые почвы и породы: делювиально-аллювиальные отложения	0.96	1.00	0.98
Открытые почвы и породы: глыбовые лавы, тип поверхности: осыпи/курумы	0.79	0.82	0.80
Естественная растительность + покрытие: разреженное (10–20%), форма: травянистая/кустарниковая	0.82	0.82	0.82
Естественная растительность + покрытие: сомкнутое (>60%), форма: травянистая/кустарниковая	0.99	0.99	0.99
Естественные водные объекты	0.94	0.94	0.94
Снежный покров и снежники	0.96	0.97	0.97
Открытые почвы и породы: обнаженные коренные породы, смешанные типы	0.87	0.85	0.86
Открытые почвы и породы: смешанные обломочные отложения склонов	0.88	0.97	0.92

Выделение кольцевых и линейных структур

Линейные и кольцевые структуры выделены по снимку **Ресурс-П, ЦМР** и морфологическим особенностям рельефа с помощью **машинного обучения**.

- Линейные структуры выделены по вытянутым формам рельефа и интерпретированы как зоны разломов и трещиноватости.
- Кольцевые структуры соотнесены с вулкано-тектоническими формами: кратерами и кольцевыми морфоструктурами.



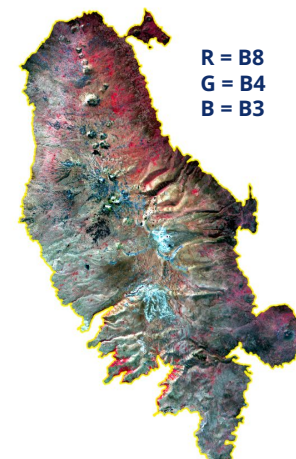
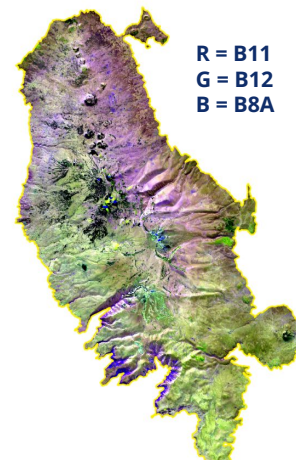
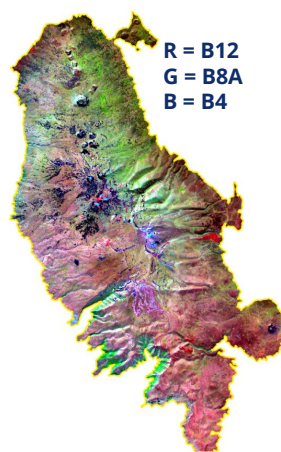
Вулканические отложения

Предварительная обработка

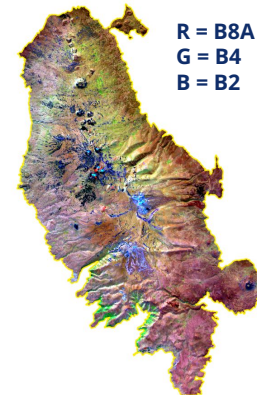
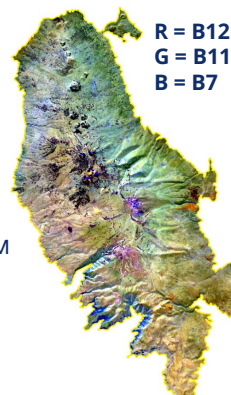
данных: атмосферная и радиометрическая коррекция снимка Sentinel-2, перепроецирование в UTM зона 38N / WGS84.

Синтезы каналов: 5 различных синтезов (B2–B4, B5–B8A, B11–B12).

- Синтезы с **NIR** и **SWIR** наиболее информативны для выделения вулканических отложений.
- Свежие и слабо выветрелые лавовые потоки лучше выделяются в комбинациях с каналами **B11** и **B12**.
- Растительность, снег и водные объекты отделяются от лавовых и обломочных поверхностей из-за контраста в **B8/B8A** и SWIR-каналах.



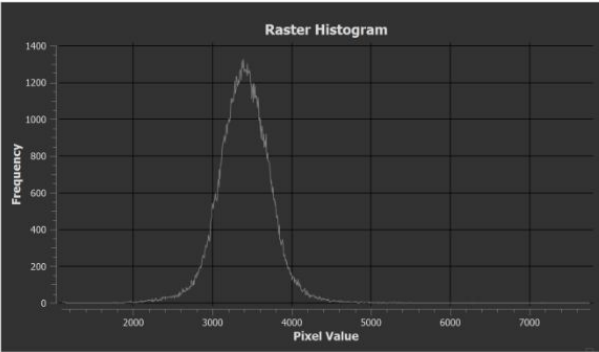
B1 — coastal aerosol, 443 нм
B2 — синий, 490 нм
B3 — зеленый, 560 нм
B4 — красный, 665 нм
B5 — red edge, 705 нм
B6 — red edge, 740 нм
B7 — red edge, 783 нм
B8 — ближний ИК (NIR), 842 нм
B8A — узкий ближний ИК (NIR narrow), 865 нм
B11 — SWIR-1, 1610 нм
B12 — SWIR-2, 2190 нм



Вулканические отложения

Квантование синтезов по яркостным характеристикам: выделение классов на основе полученных изображений.

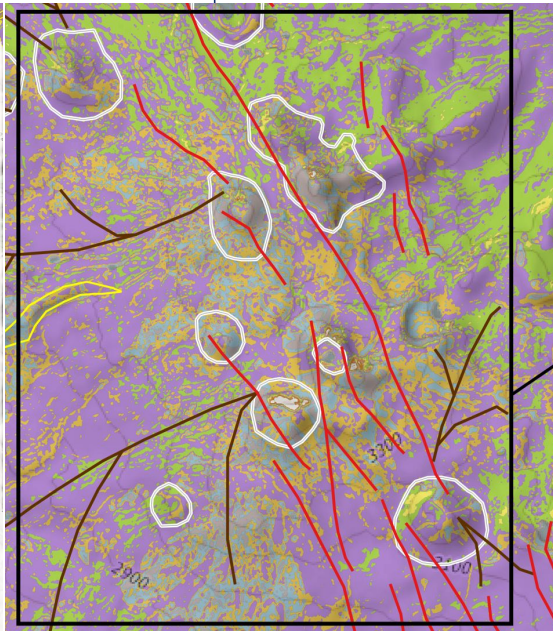
На основе распределения значений яркости и анализа гистограмм были выделены интервалы, соответствующие различным типам вулканических отложений и сопутствующих поверхностей.



Материал/тип	Примерный диапазон яркости
Базальтовые лавы голоценового возраста	1500 – 2200
Базальтовые лавы верхнего плейстоцена	2200 – 2700
Трахиандезиты и трахибазальты	2700 – 3200
Базальтовые трахиандезиты	3200 – 3700
Четвертичные коллювиально-делювиальные отложения	3700 – 4200
Аллювиально-пролювиальные отложения	4200 – 4700
Глыбовые лавобрекчии и курумы	4700 – 5200
Вулканогенно-осадочные образования	5200 – 5700
Современные снежно-ледовые образования	5700 – 8500

Вулканические отложения

-  Базальтовые лавы голоценового возраста
-  Базальтовые лавы верхнего плейстоцена
-  Трахиандезиты и трахибазальты
-  Базальтовые трахиандезиты
-  Четвертичные коллювиально-делювиальные отложения
-  Аллювиально-пролювиальные отложения
-  Глыбовые лавобрекчии и курумы
-  Вулканогенно-осадочные образования

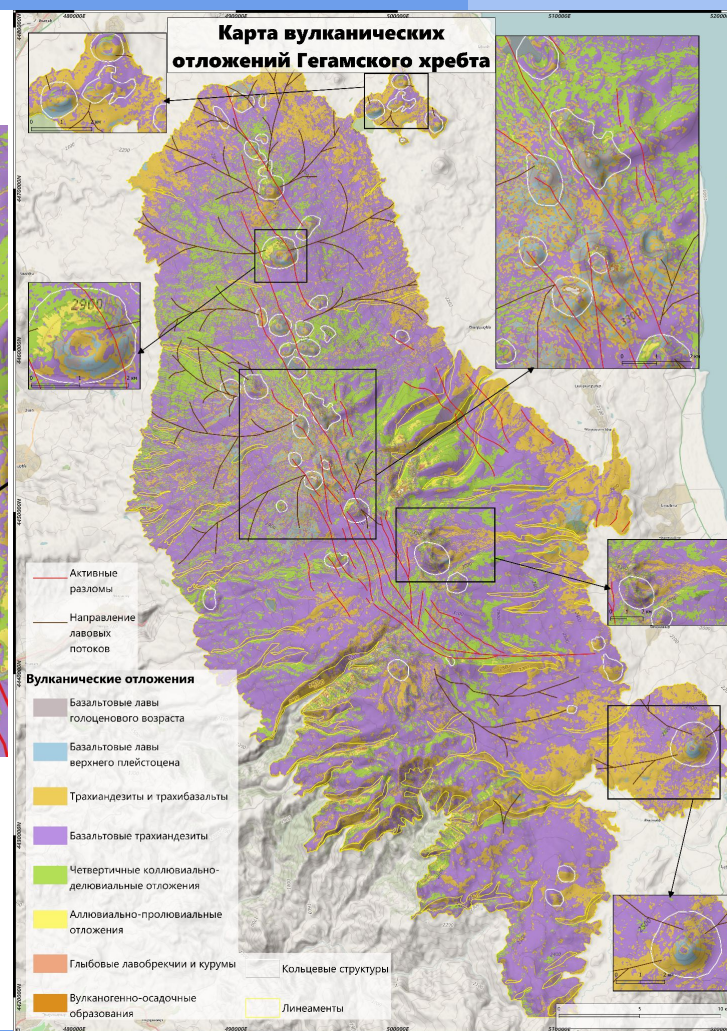


Кольцевые структуры

Линеаменты

Активные разломы

Направление лавовых потоков

Карта вулканических отложений Гегамского хребта**Вулканические отложения**

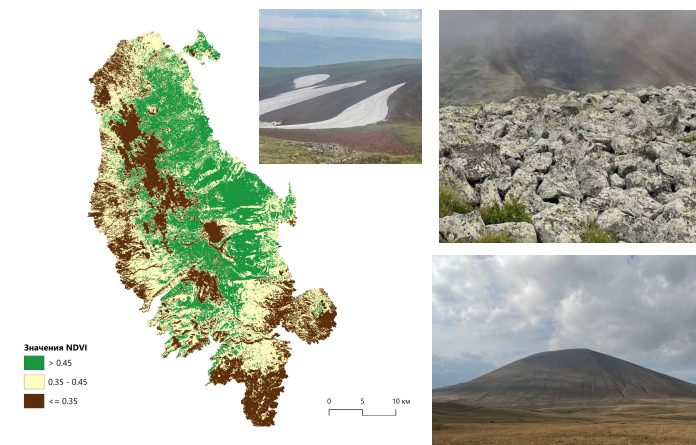
-  Базальтовые лавы голоценового возраста
-  Базальтовые лавы верхнего плейстоцена
-  Трахиандезиты и трахибазальты
-  Базальтовые трахиандезиты
-  Четвертичные коллювиально-делювиальные отложения
- Аллювиально-пролювиальные отложения
- Глыбовые лавобрекчии и курумы
- Вулканогенно-осадочные образования

Кольцевые структуры

Линеаменты

Результаты

- Разработана **методика крупномасштабного картографирования** наземного покрова и вулканических отложений Гегамского нагорья на основе данных Sentinel-2, PlanetScope, цифровых моделей рельефа и **методов машинного обучения**.
- Выполнена **классификация наземного покрова** по 10 классам в системе LCCS и составлены карты распространения основных типов поверхностей и вулканических отложений.
- Выделены **вулканические отложения**, различающиеся по составу и степени выветрелости.
- По данным ЦМР, Ресурс-П в сочетании с машинным обучением выявлены **линейные и кольцевые структуры**, уточняющие морфоструктурные особенности территории.
- Определены наиболее информативные спектральные индексы, морфометрические признаки и комбинации каналов для распознавания лавовых потоков и сопутствующих отложений.



Заключение и выводы

- Использование мультиспектральных спутниковых данных, цифровых моделей рельефа и алгоритмов машинного обучения **эффективно для крупномасштабного картографирования** вулканических территорий.
- Наилучшие результаты достигаются при совместном использовании индексов NDVI, SAVI, Rock Index и морфометрических параметров рельефа.
- Для большинства выделенных классов получена **высокая точность классификации**, максимальные значения F1 (среднее между precision и recall, мера качества по классу) достигают 0.99 для отдельных типов поверхностей.
- Полученные карты и методические подходы могут использоваться для геологического картографирования, оценки природных рисков и дальнейших исследований других вулканических районов.



ИКИ РАН

Москва
2026

Крупномасштабное картографирование наземного покрова Гегамского хребта с использованием инструментов машинного обучения для классификации вулканических отложений

Пономарева Анастасия

НИУ ВШЭ, Факультет географии и геоинформационных технологий,
Институт географии РАН, Центр природно-антропогенных геосистем

Научный руководитель: Медведев Андрей Александрович
зав. отделом картографии и дистанционного зондирования Земли, Институт географии РАН, к.г.н.