

Цифровое моделирование рельефа антарктических оазисов

И.В. Флоринский

*Институт математических проблем биологии РАН –
филиал ФИЦ «Институт прикладной математики им.
М.В. Келдыша РАН», Пущино*



Типы территорий

1. Антарктические оазисы
 - пришельфовые
 - прибрежные
 - горные
2. Острова
3. Горные хребты и нунатаки

Природные особенности

- Микроклимат
- Непромерзающие сезонные ручьи и озера
- Примитивные почвы и биота

Свободные от ледникового покрова территории Антарктики

~ 200 территорий

Общая площадь:

0,3% – 1% континента
47 000 км² – 141 000 км²

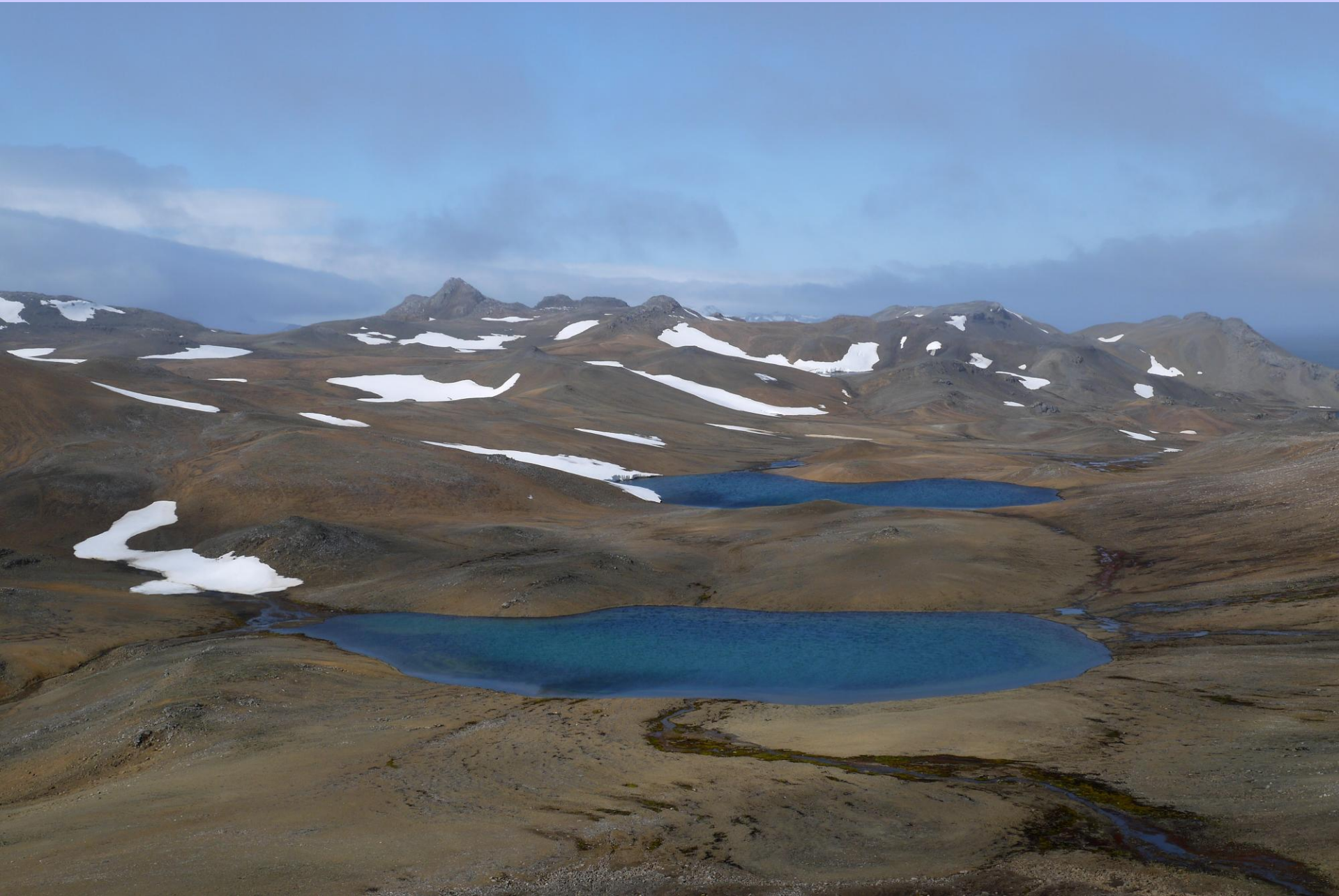
Средняя площадь
300 км²



Типичный ландшафт оазиса (холмы Ларсеманн)



Типичный ландшафт острова (полуостров Файлдс, остров Кинг-Джордж)



Типичный нунатак



Геоморфометрия

Научная дисциплина с развитой физико-математической теорией и мощным аппаратом вычислительных методов, сформировавшаяся на стыке фотограмметрии, геоинформатики и вычислительной математики, предметом которой является цифровое моделирование и математический анализ рельефа, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем.

Морфометрические величины

Локальные

- Крутизна
- Ориентация
- Горизонтальная кривизна
- Вертикальная кривизна
- Средняя кривизна
- Гауссова кривизна
- Минимальная кривизна
- Максимальная кривизна
- Несферичность
- Избыточная горизонтальная кривизна
- Избыточная вертикальная кривизна
- Аккумуляционная кривизна
- Кольцевая кривизна

Высота

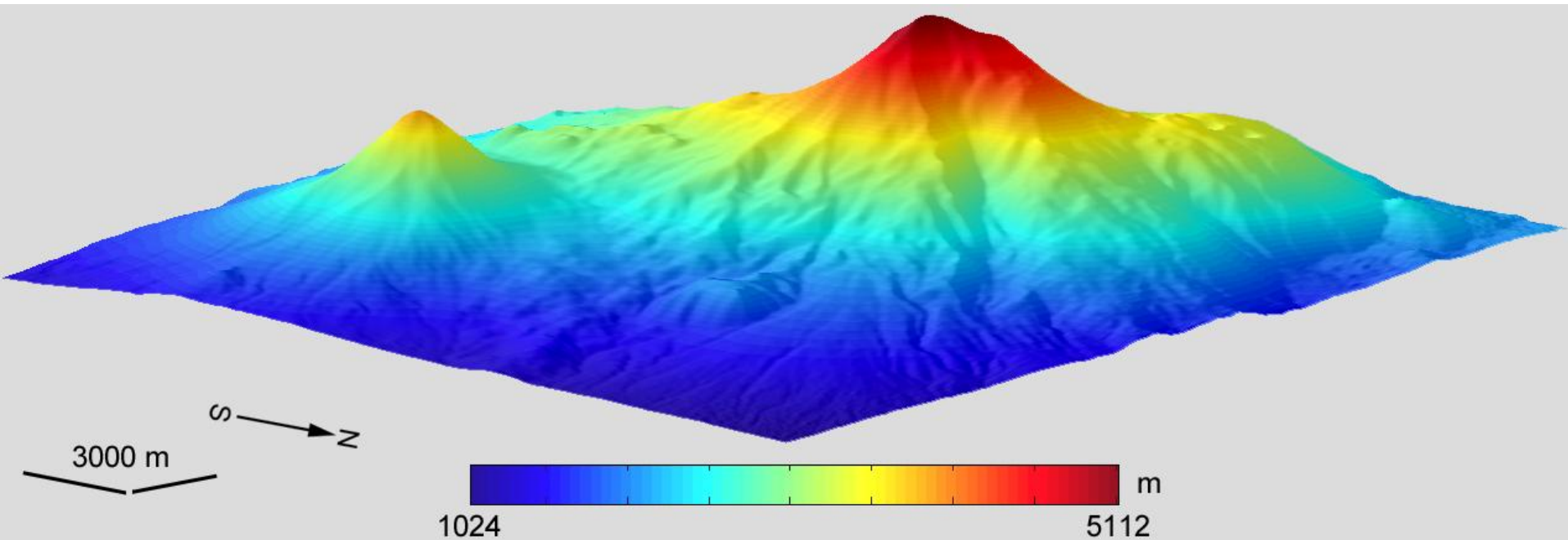
Нелокальные

- Водосборная площадь
- Индекс ветрового воздействия
- Индекс ветрового укрытия

Комбинированные

- Топографический индекс влажности
- Индекс мощности потоков

Высота



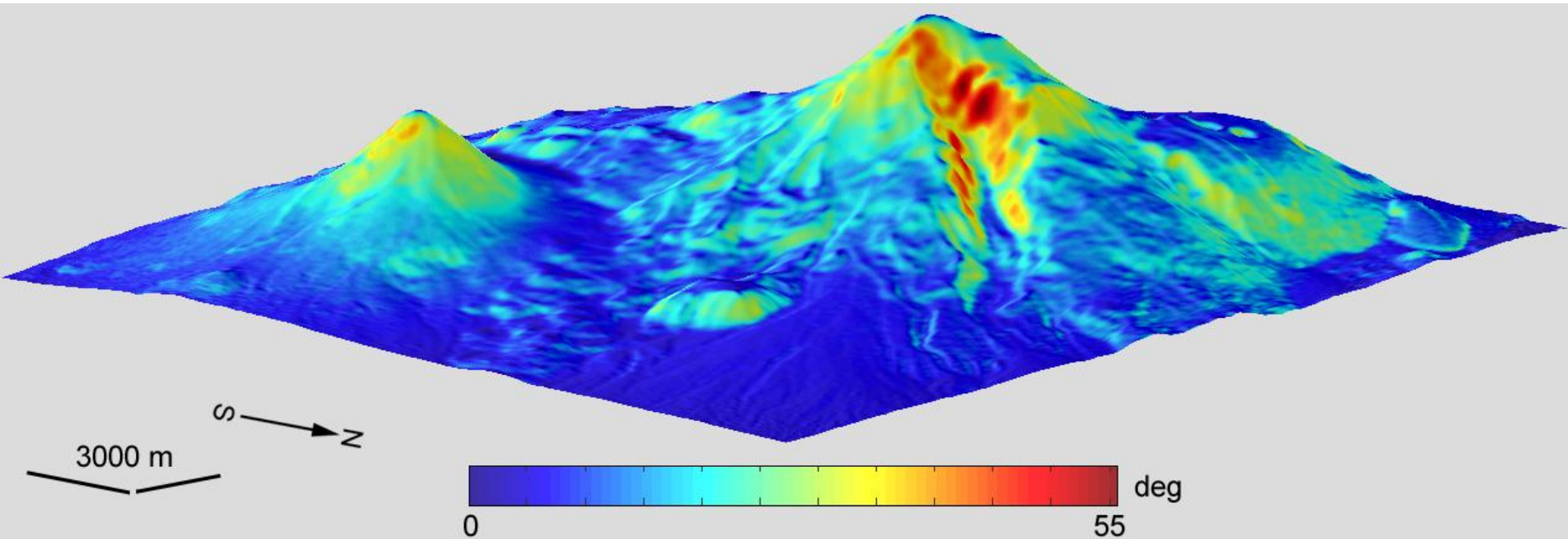
Арагат

Исходные данные: SRTM1
779 401 точек (матрица 1081×721)

$$w = 1''$$

300 коэффициентов разложения

Крутизна

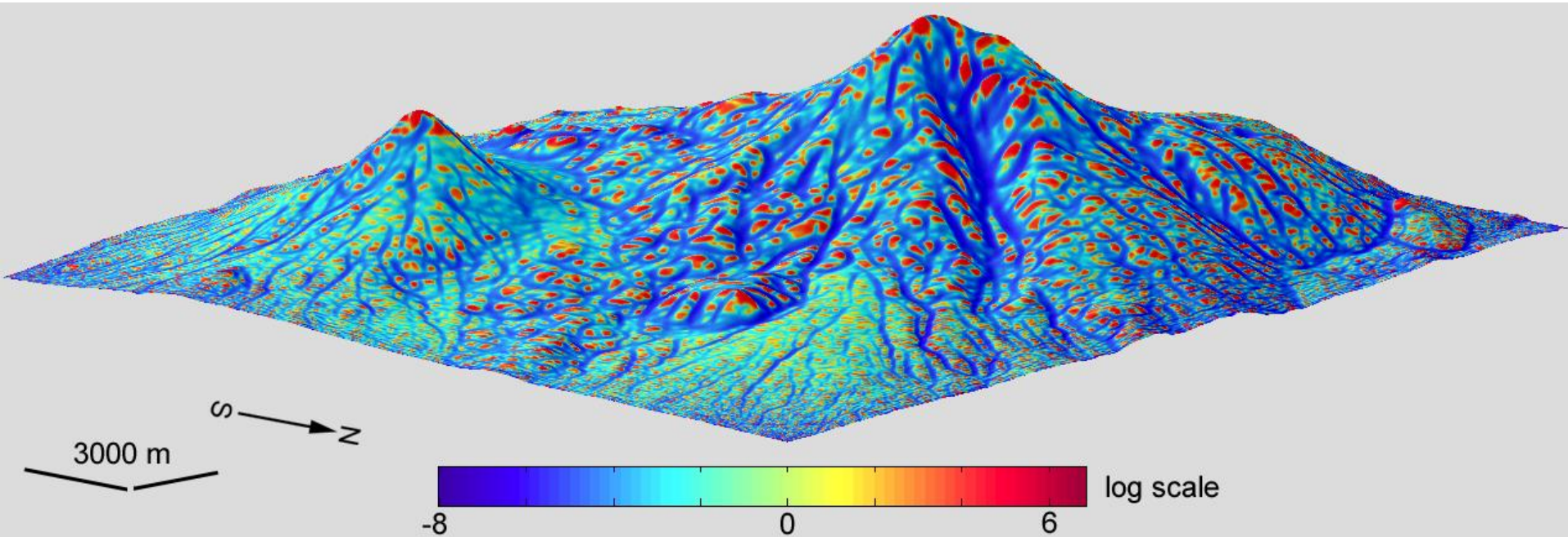


$$G = \arctg \sqrt{p^2 + q^2}$$

Угол между горизонтальной и тангенциальной плоскостями в данной точке топографической поверхности.

Определяет скорость потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации.

Минимальная кривизна

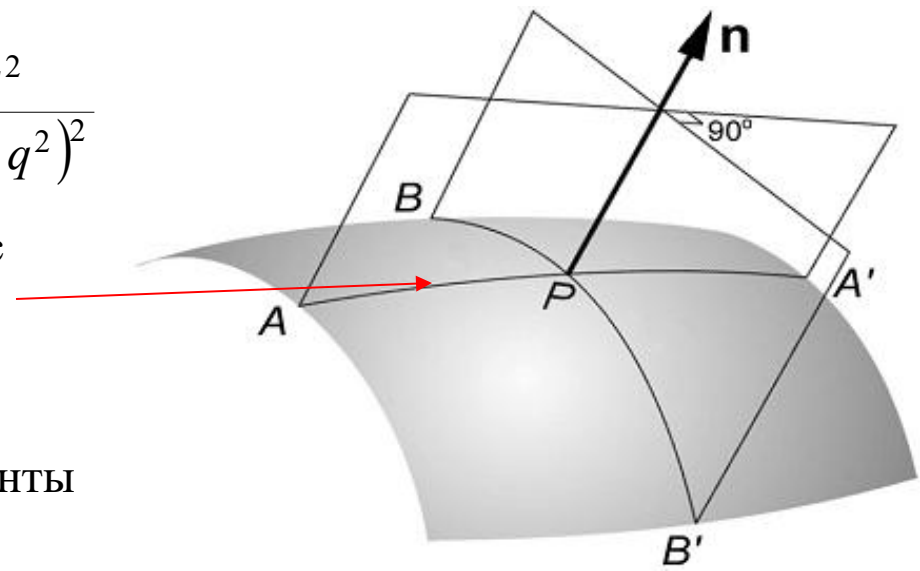


$$k_{\min} = H - \sqrt{H^2 - K}$$

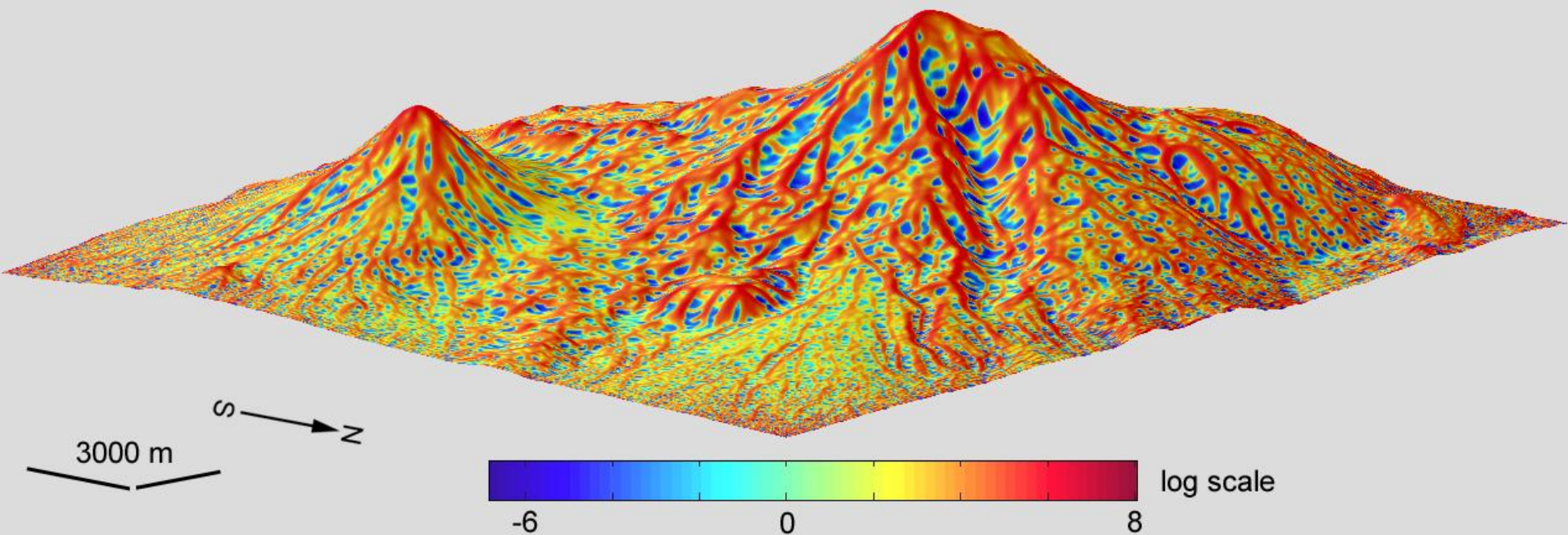
$$H = -\frac{(1+q^2)r - 2pqs + (1+p^2)t}{2\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \quad K = \frac{rt - s^2}{(1+p^2+q^2)^2}$$

Кривизна главного нормального сечения AA' с минимальным изгибом в данной точке P топографической поверхности.

$k_{\min} > 0$ выделяют локальные выпуклые элементы рельефа; $k_{\min} < 0$ выделяют долины.



Максимальная кривизна

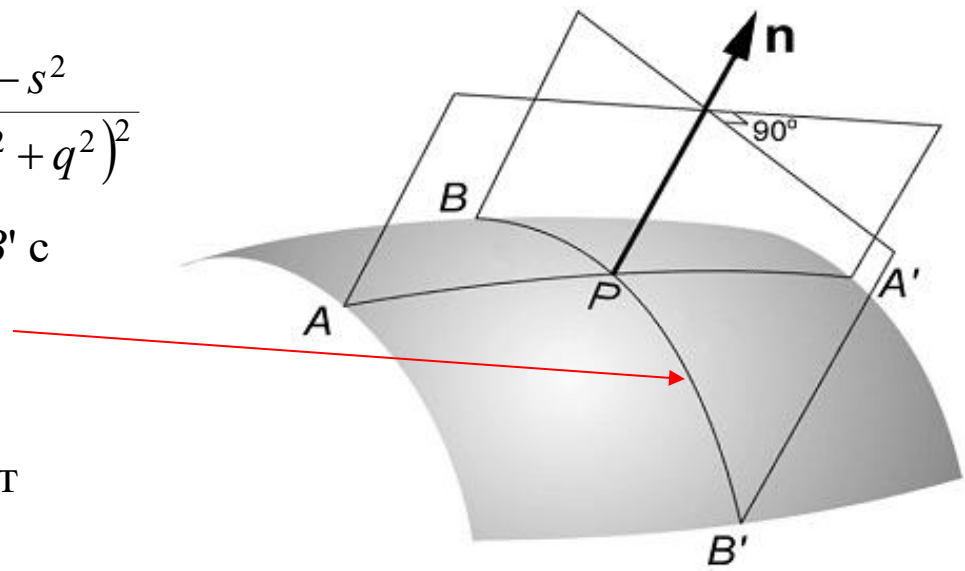


$$k_{\max} = H + \sqrt{H^2 - K}$$

$$H = -\frac{(1+q^2)r - 2pqs + (1+p^2)t}{2\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}}$$

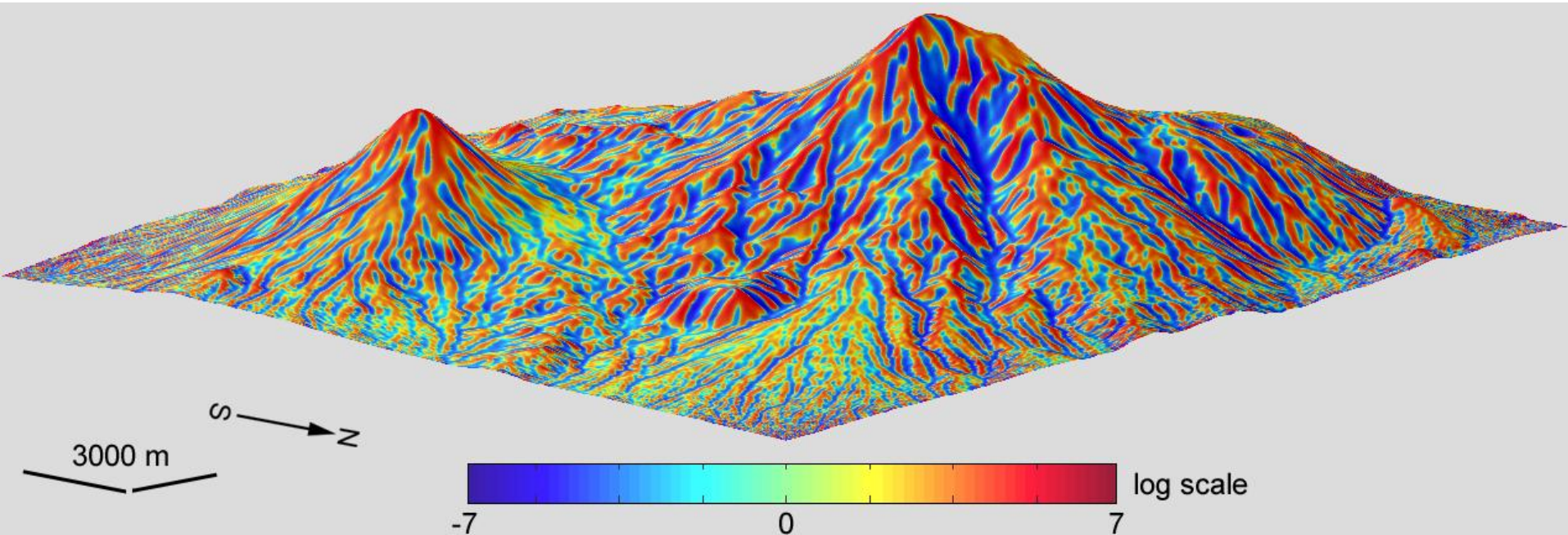
$$K = \frac{rt - s^2}{(1+p^2+q^2)^2}$$

Кривизна главного нормального сечения BB' с максимальным изгибом в данной точке P топографической поверхности.



$k_{\max} > 0$ выделяют хребты; $k_{\max} < 0$ выделяют локальные вогнутые элементы рельефа.

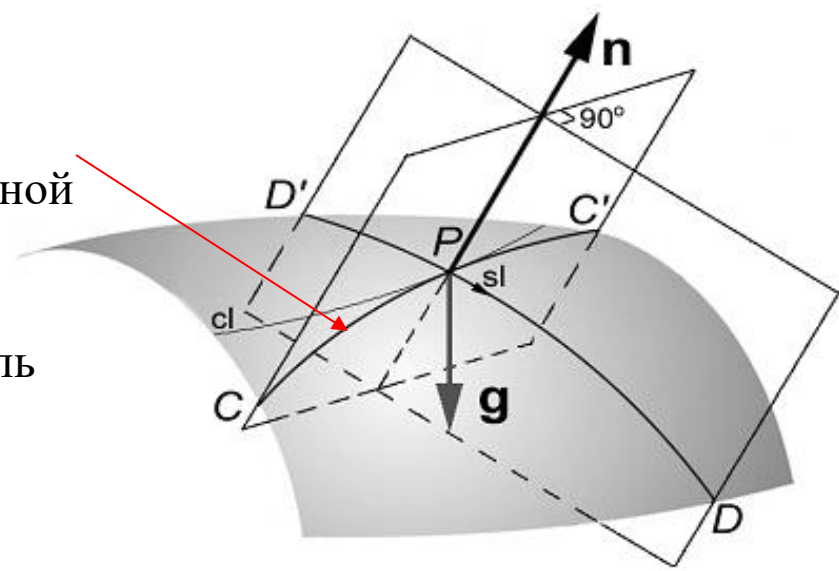
Горизонтальная кривизна



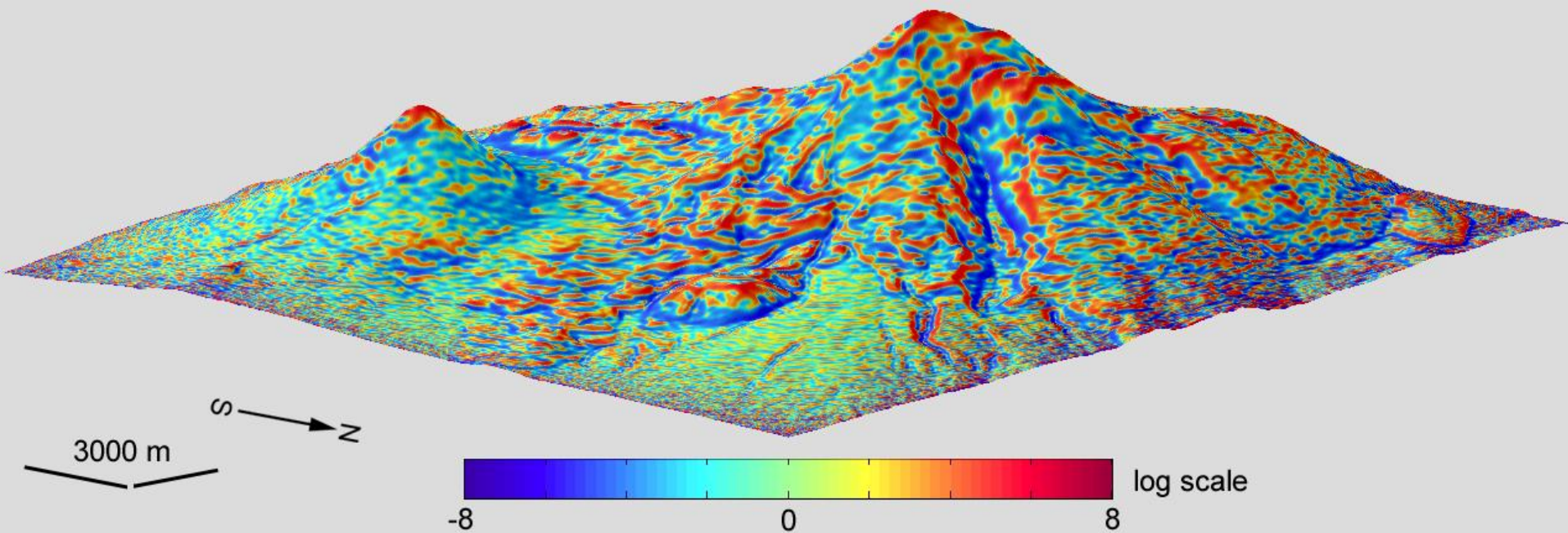
$$k_h = -\frac{q^2r - 2pqs + p^2t}{(p^2 + q^2)\sqrt{1 + p^2 + q^2}}$$

Кривизна нормального сечения CC' , выделенного гравитацией, тангенциального горизонта cl в данной точке P топографической поверхности.

Мера конвергенции потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации:
конвергируют при $k_h < 0$; дивергируют при $k_h > 0$.



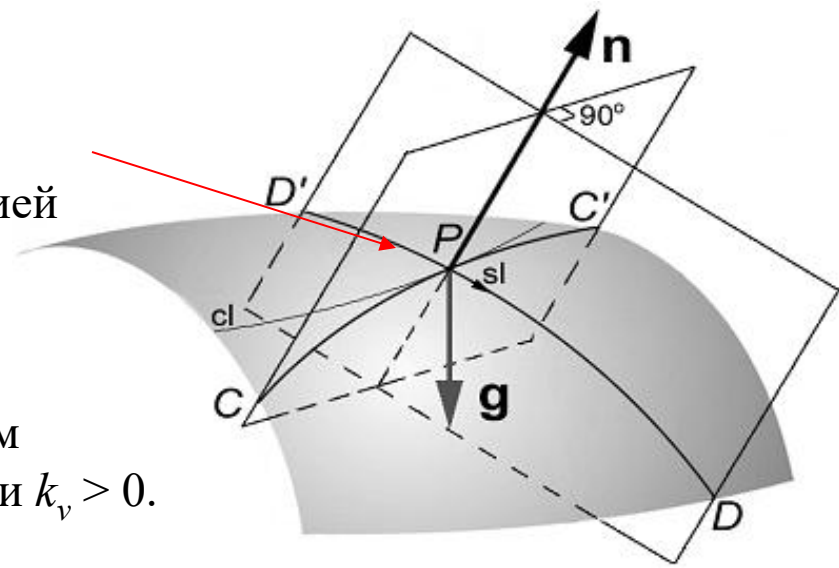
Вертикальная кривизна



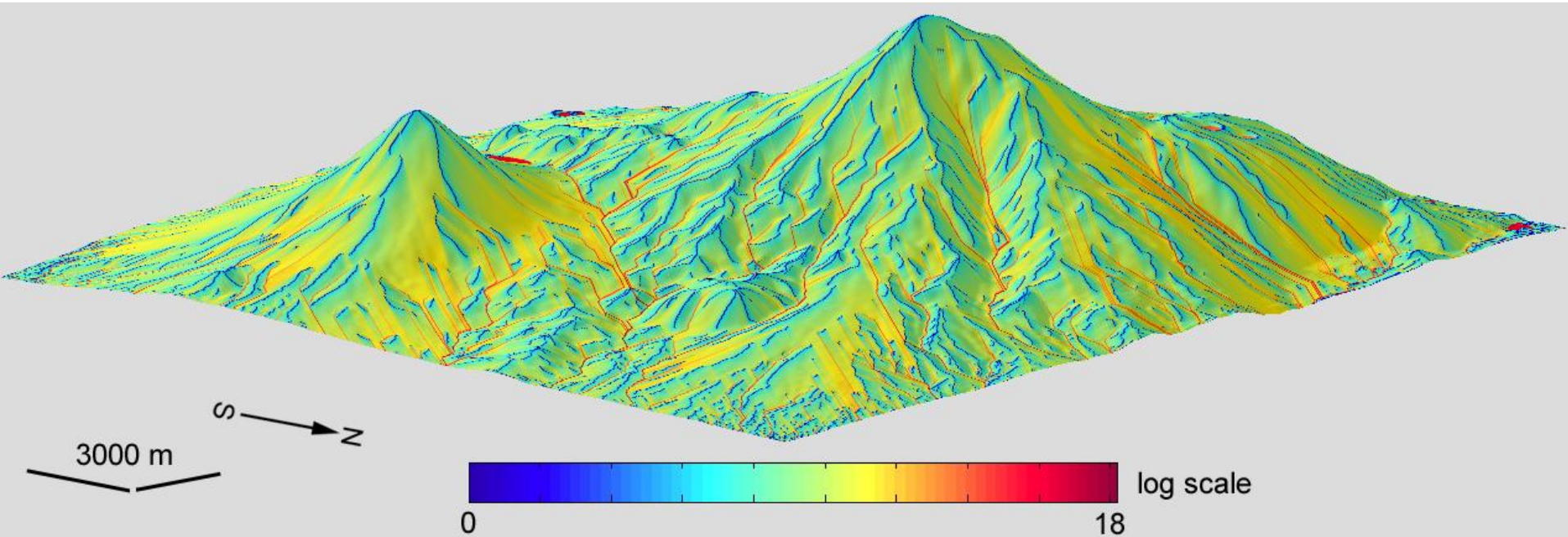
$$k_v = - \frac{p^2 r + 2 p q s + q^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$$

Кривизна нормального сечения DD' , выделенного гравитацией, имеющего общую касательную с линией скольжения sl в данной точке P поверхности.

Мера относительного замедления потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации: замедляются при $k_v < 0$; ускоряются при $k_v > 0$.

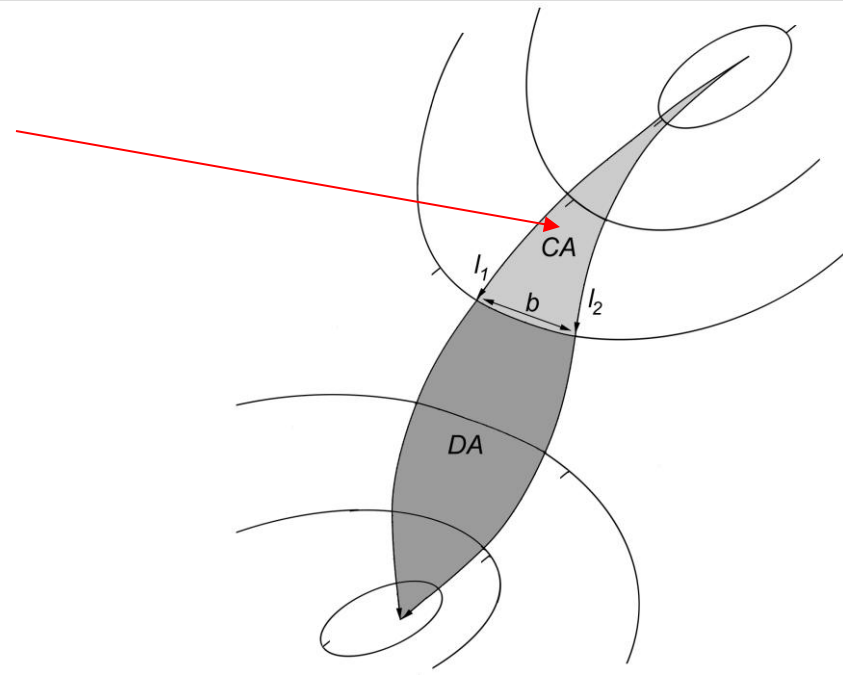


Водосборная площадь

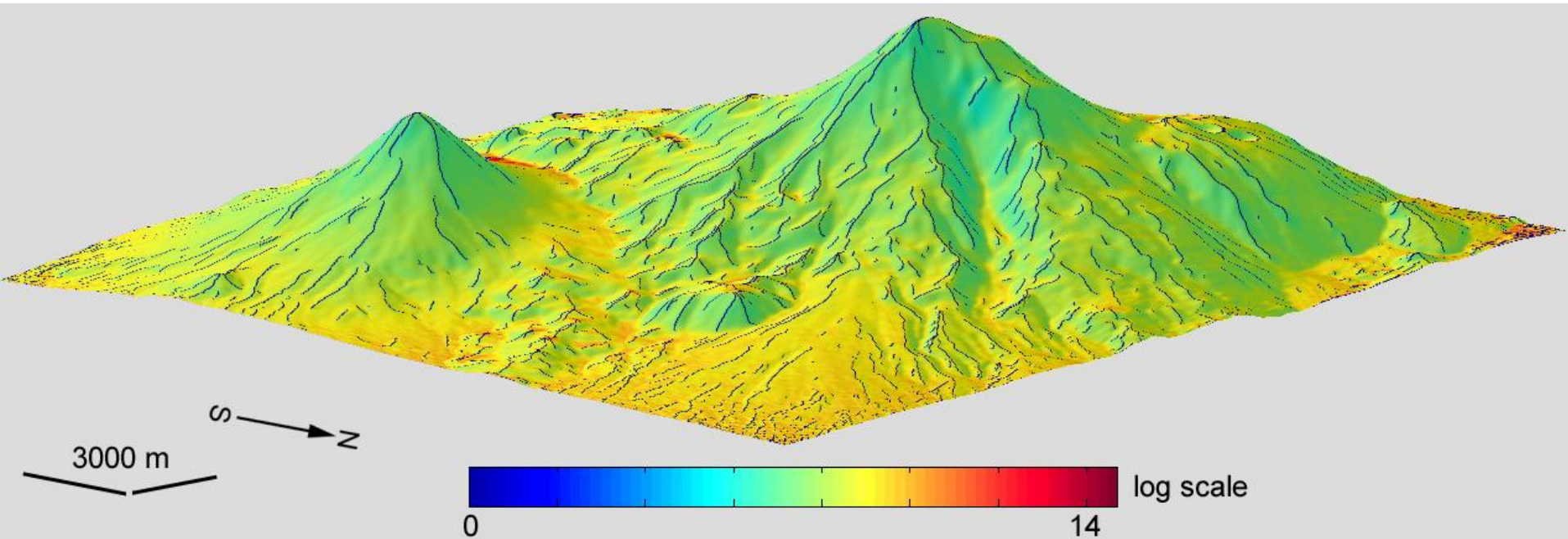


Площадь замкнутой фигуры CA , сформированной отрезком горизонтали b , который включает данную точку поверхности, и двумя линиями тока l_1 и l_2 , приходящими с вышележащей точки на концы отрезка.

Мера площади вышележащих участков, которые могут дренироваться через данную точку поверхности.



Топографический индекс



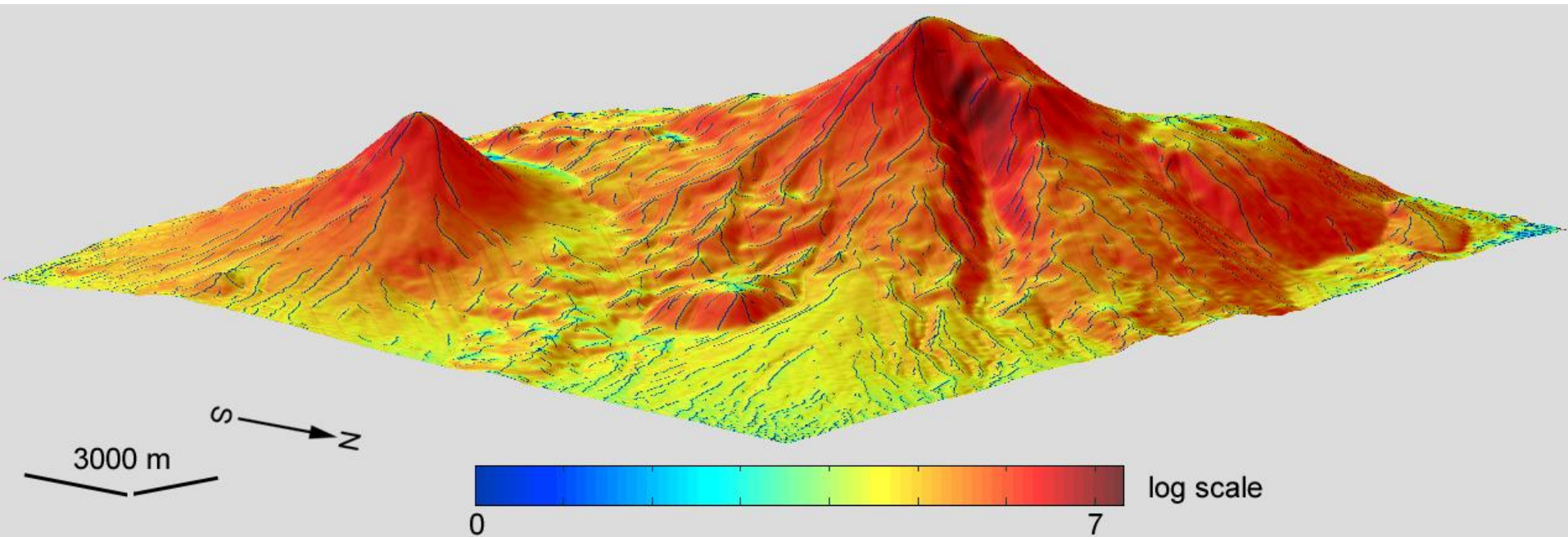
$$TI = \ln \left[1 + CA / (10^{-3} + \text{tg } G) \right]$$

Мера аккумуляции потоков.

Чем больше водосборная площадь и чем меньше крутизна склонов, тем выше значение топографического индекса.

Чем больше объем воды, приходящей в данную точку с вышележащих участков и чем ниже скорость этих потоков, тем больше аккумулируется влаги в данной точке.

Индекс мощности потока



$$SI = \ln(1 + CA \cdot \text{tg } G)$$

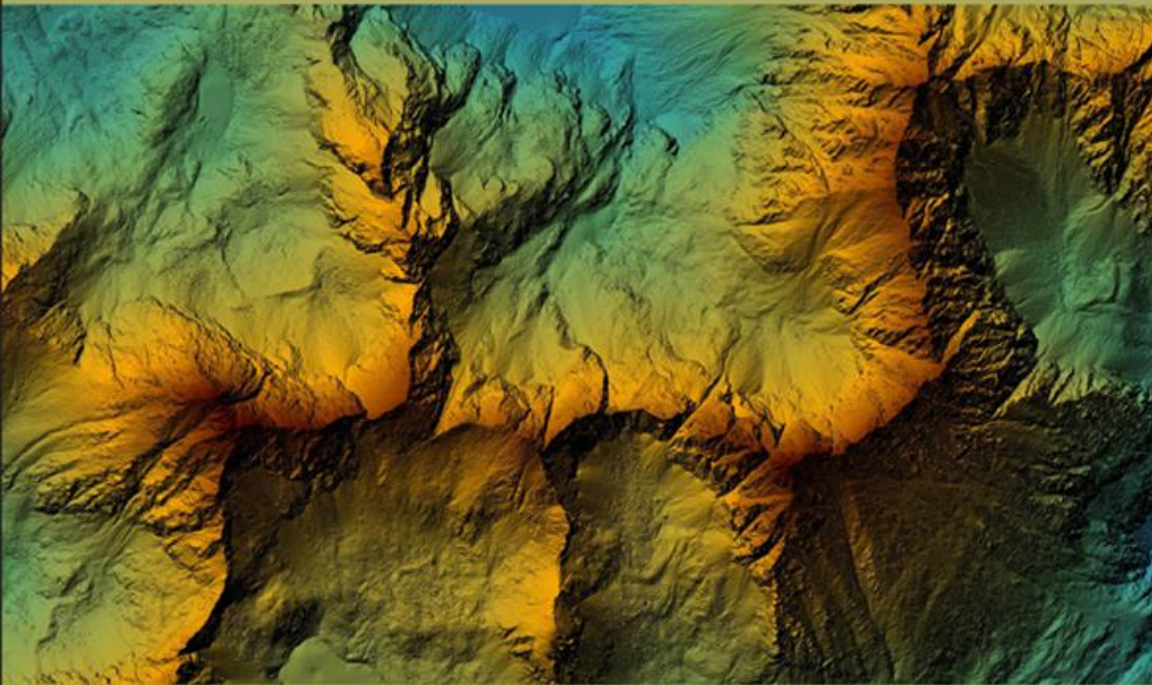
Мера потенциальной интенсивности эрозии.

Чем больше водосборная площадь и крутизна склонов, тем выше значение индекса мощности потоков.

Чем больше объем воды, приходящей в данную точку с вышележащих участков и чем выше скорость этих потоков, тем выше вероятность эрозии.

DIGITAL TERRAIN ANALYSIS

3RD EDITION



IGOR V. FLORINSKY



DIGITAL TERRAIN ANALYSIS

3rd revised and enlarged
edition

I.V. Florinsky

London:
Elsevier / Academic Press,
2025, 455 p.

ISBN 978-0-44-324798-9

Геоморфометрические методы широко применяются для решения различных разномасштабных задач наук о Земле.

Геоморфометрическое моделирование и картографирование свободных от оледенения территорий Антарктики перспективно как для получения новых знаний о количественных характеристиках рельефа этих уникальных районов, так и для дальнейшего использования морфометрической информации для решения фундаментальных и прикладных задач геоморфологии, геологии, почвоведения, экологии, геофизики, гляциологии, климатологии и др.

Создание геоморфометрического атласа свободных от оледенения территорий Антарктики позволит обобщить и систематизировать региональную морфометрическую информацию в традиционном для наук о Земле формате.

Цель работы

Разработка и создание физико-географического тематического научно-справочного геоморфометрического атласа свободных от оледенения территорий Антарктики.

Формы опубликования:

полиграфическая (настольный атлас, А3, ~800 с., 2 тома)

Сроки исполнения: 2024–2030

Разделы атласа

Вводный раздел

Земля Королевы Мод

Земля Эндерби

Земля Кемпа

Земля Мак-Робертсона

Земля Принцессы Елизаветы

Земля Вильгельма II

Земля Королевы Мэри

Земля Уилкса

Земля Георга V

Земля Отса

Земля Виктории

Трансантарктические горы

Земля Мэри Бэрд

Земля Элсуэрта

Земля Александра I

Земля Палмера

Земля Грейама

Южные Шетландские острова

Земля Котса

Справочные таблицы

Список литературы

Указатель географических названий

Перечень карт и других материалов для каждой территории

1. Серия морфометрических карт (крутизна, горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, минимальная кривизна, максимальная кривизна, водосборная площадь, топографический индекс влажности, индекс мощности потоков, индекс защищенности от ветра, ...).
2. Производные тематические карты (классификация форм рельефа, геологические линеаменты, ...).
3. Фотографии ландшафтов (?).
4. Текстовый справочный материал (методические пояснения к картам, физико-географические интерпретации морфометрических карт, ...).

1 : 10 000 000, полярная стереографическая проекция — для одной обзорной карты рельефа Антарктики (отмывка).

1 : 1 000 000, равноугольная коническая проекция Ламберта — для одной обзорной карты рельефа (отмывка) для каждого раздела атласа (региона Антарктики).

1 : 100 000 / 1 : 50 000 / 1 : 25 000, UTM — для серии морфометрических и производных тематических карт для каждой территории, в зависимости от размеров территории и читаемости рассчитываемых карт.

ЦМР

Reference Elevation Model of Antarctica (REMA)

Шаг сетки 2 м, 8 м, 10 м, 32 м, 100 м

Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica // Cryosphere. – 2019 . – Vol. 13 . – No. 2 . – pp. 665-674.

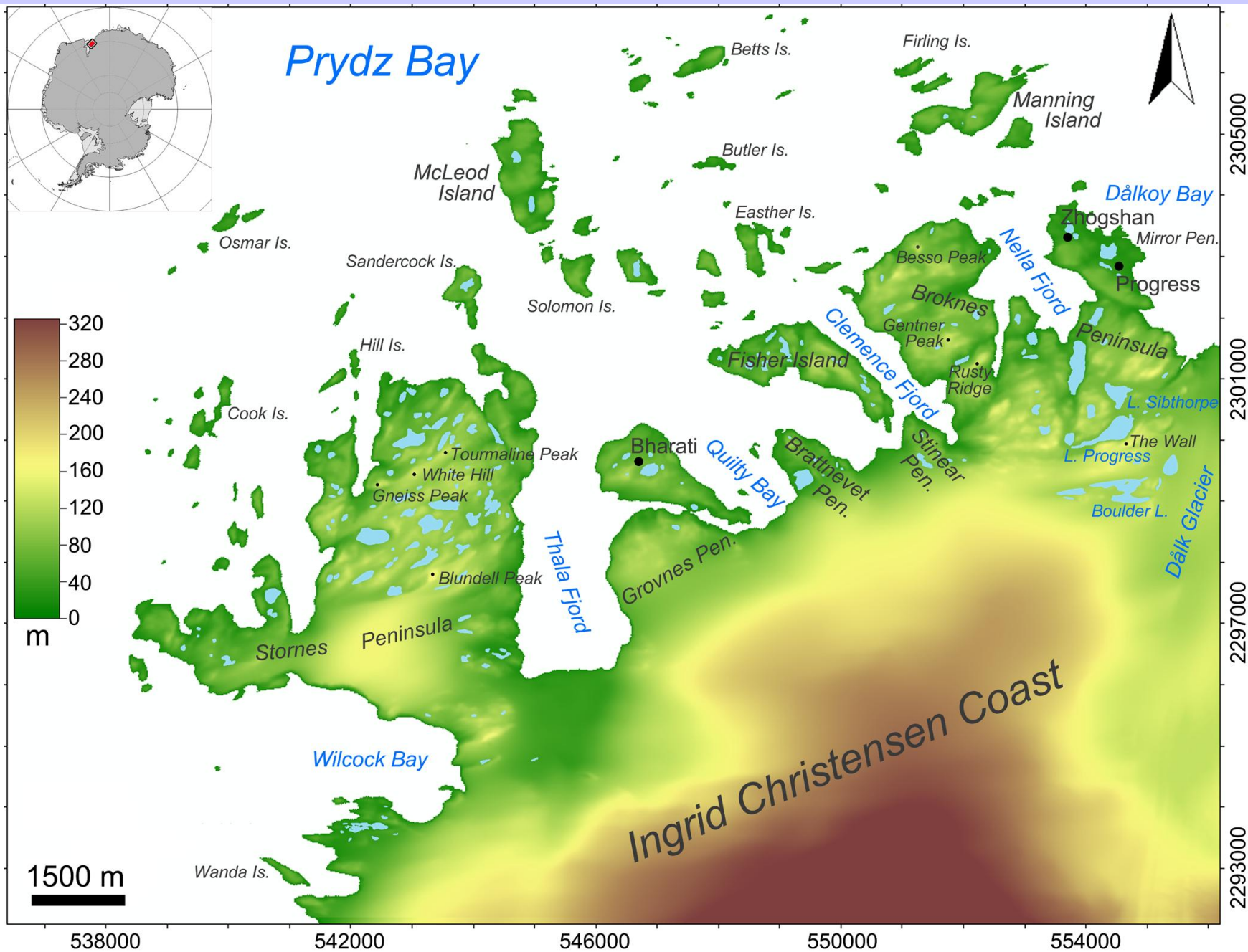
Reference Elevation Model of Antarctica (REMA). – Saint Paul: Polar Geospatial Center, University of Minnesota, 2018–2022. – <https://www.pgc.umn.edu/data/rema/>.



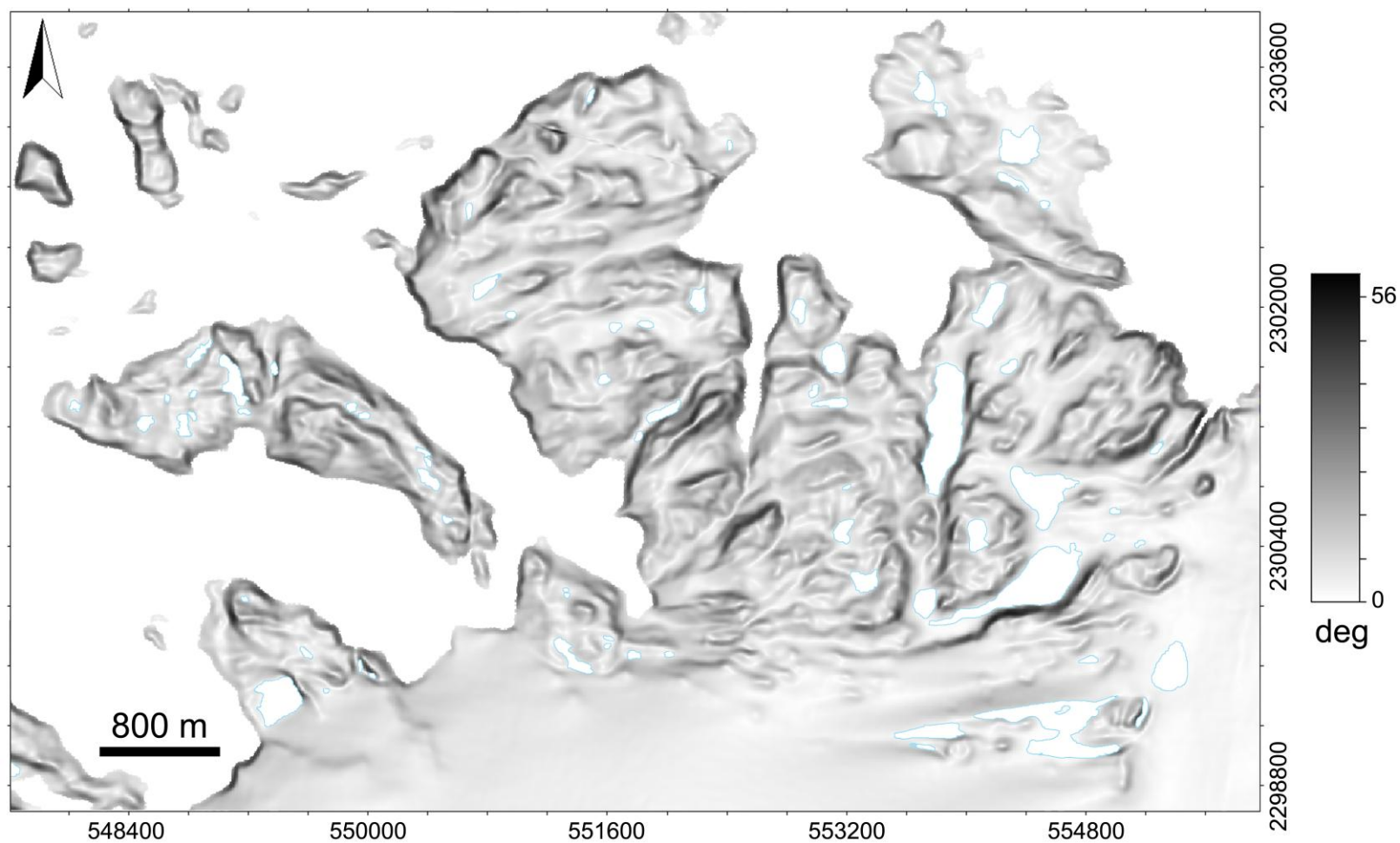
Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. – 2015. – V. 8. – P. 1991–2007.

**Пример серии морфометрических карт для полуострова Брокнес
(холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы)**

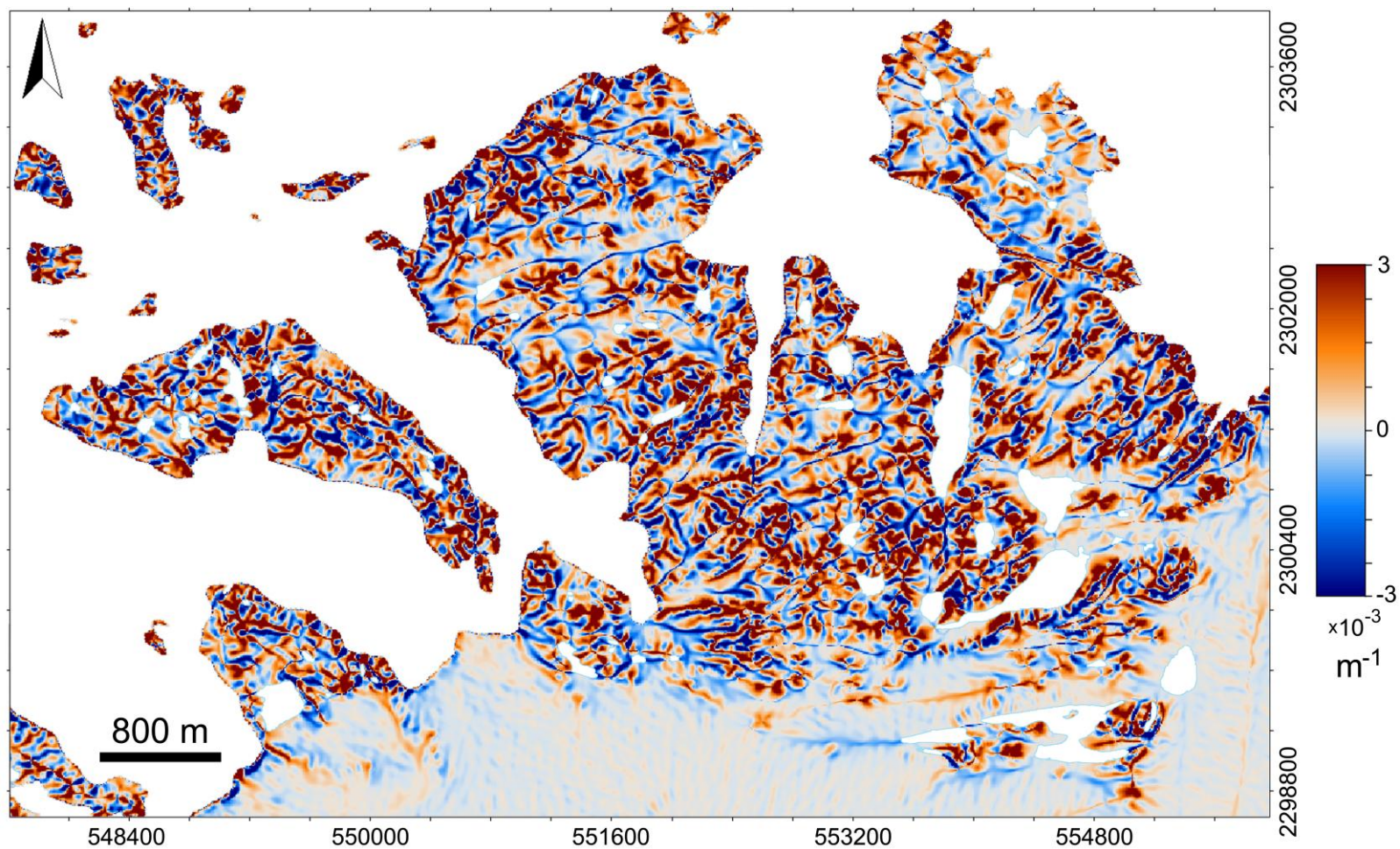
Высоты



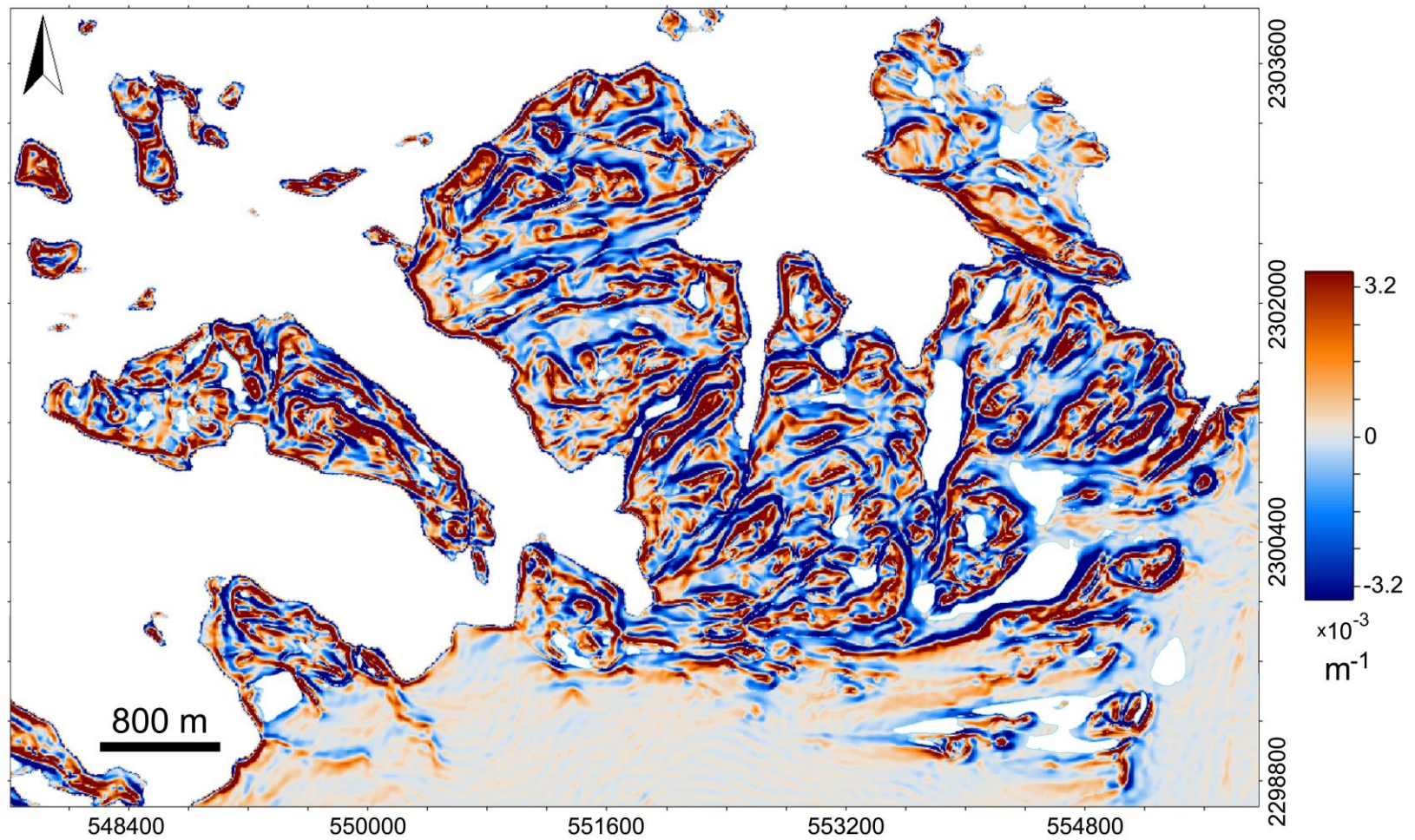
Крутизна склонов



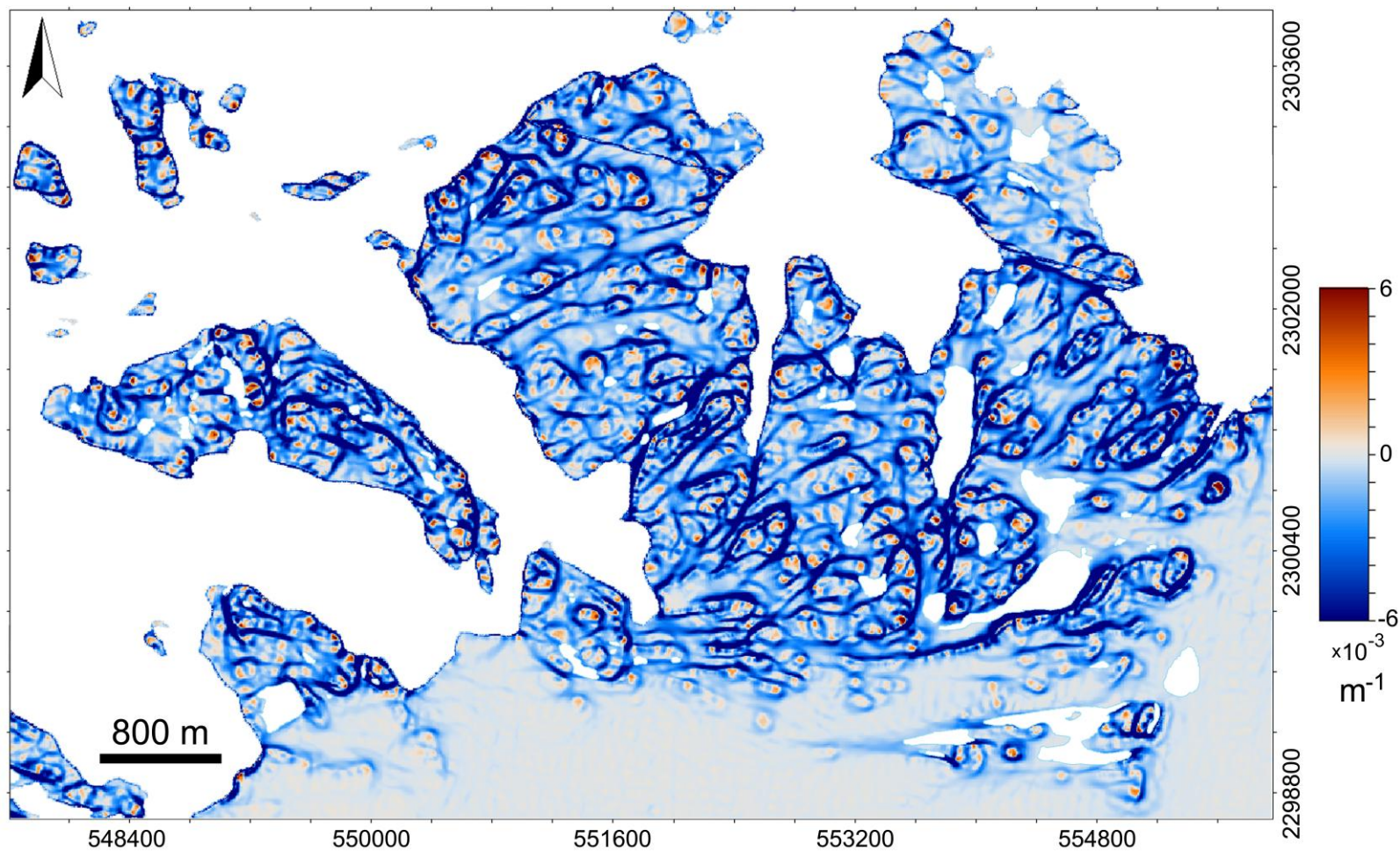
Горизонтальная кривизна



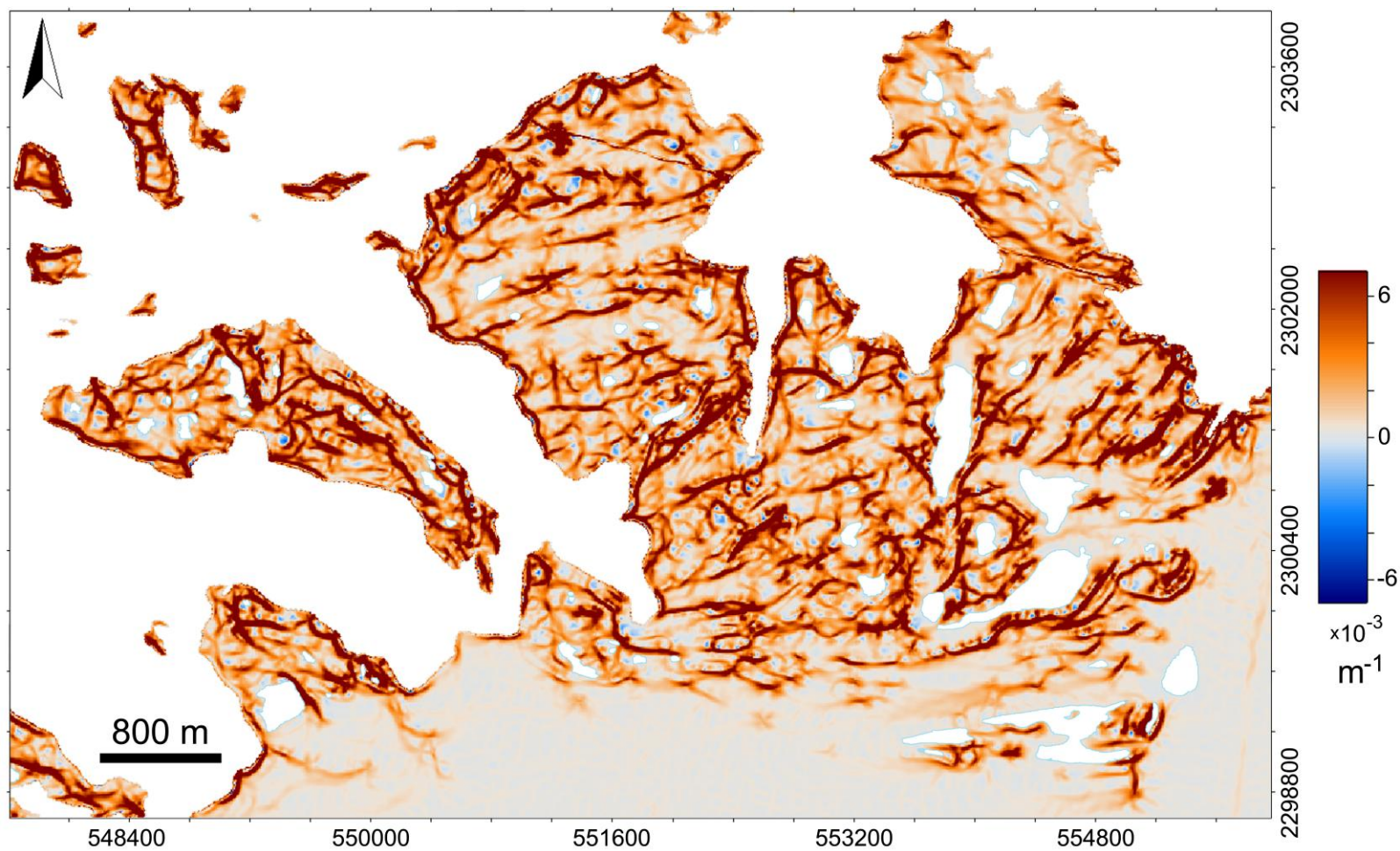
Вертикальная кривизна



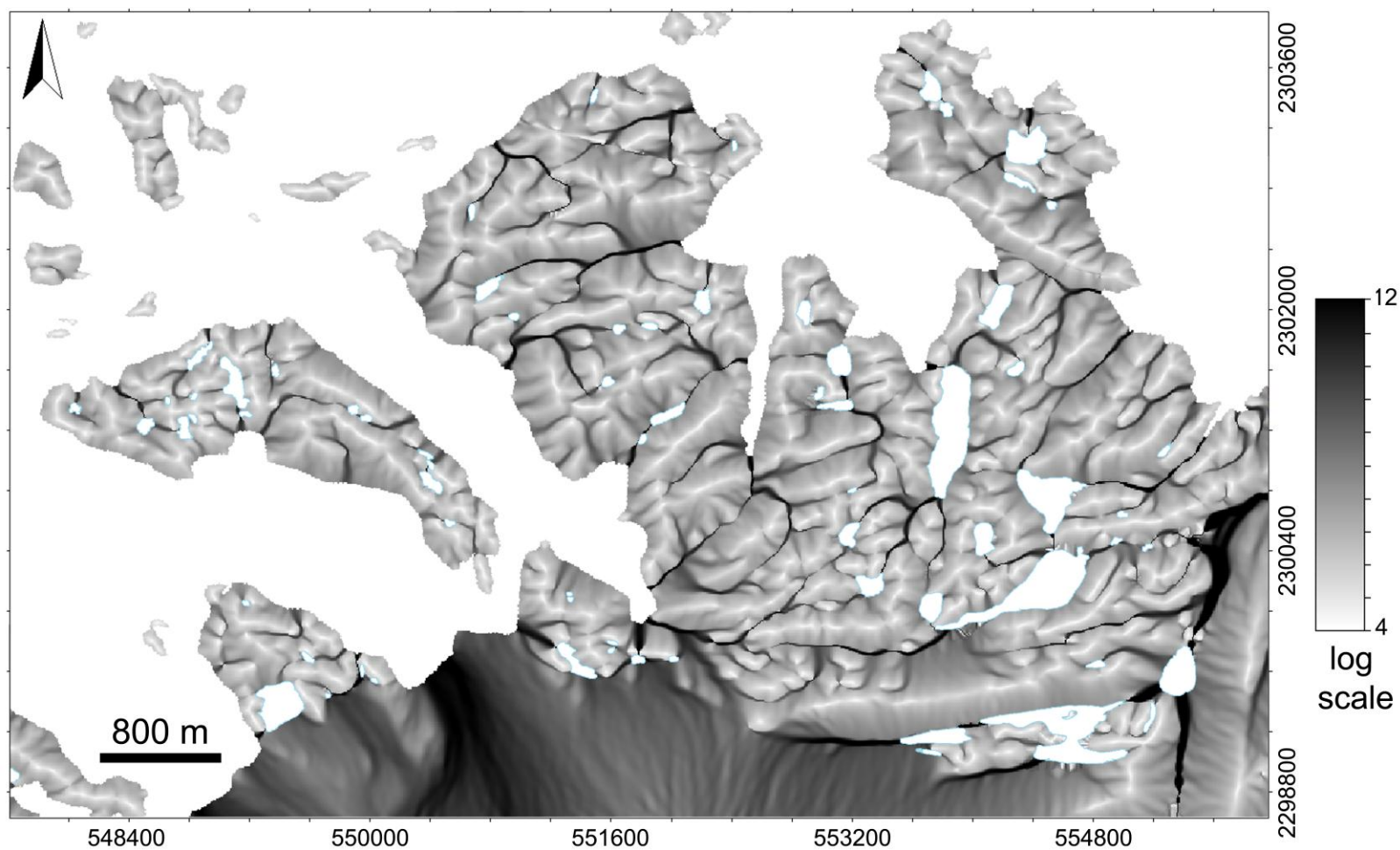
Минимальная кривизна



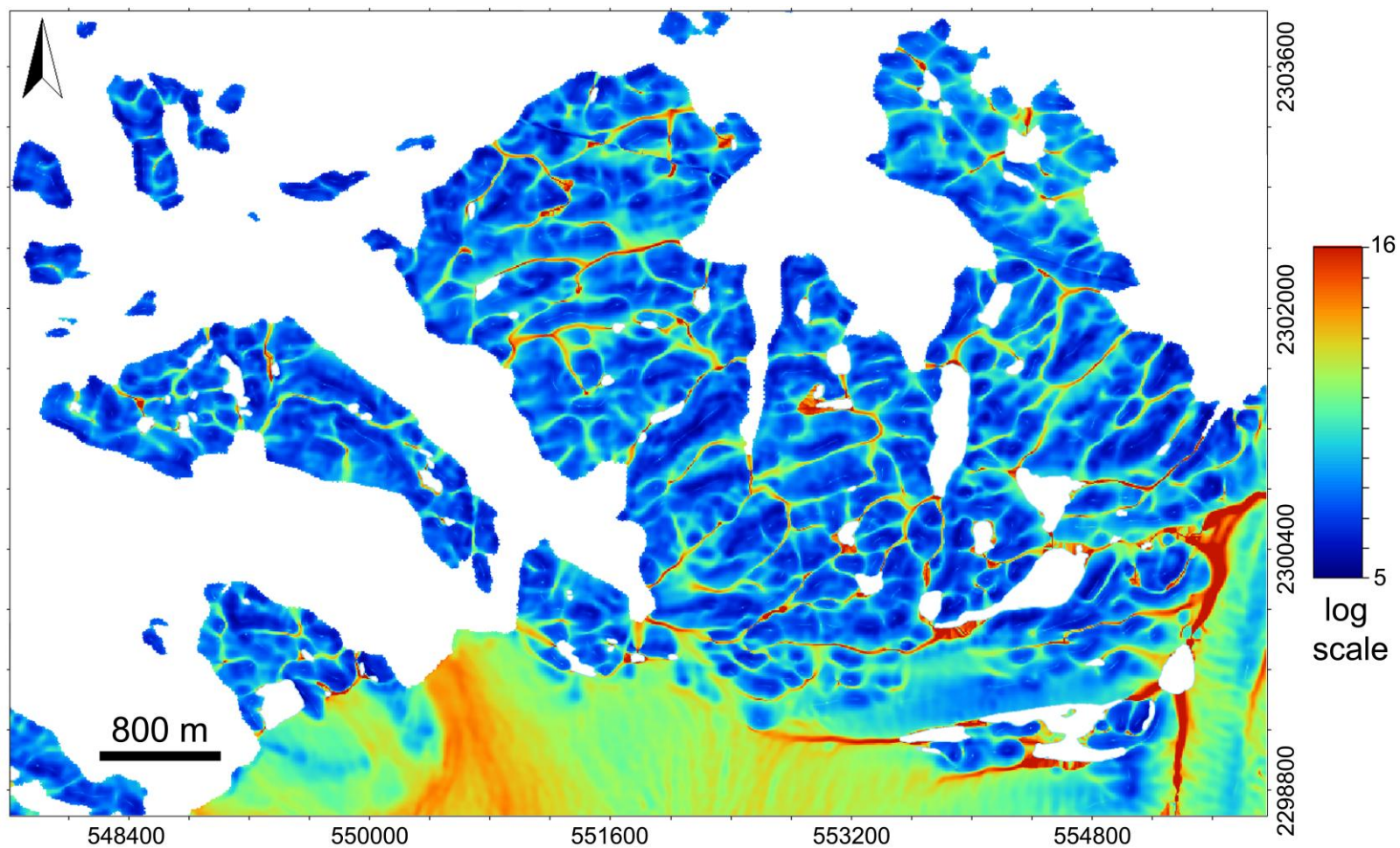
Максимальная кривизна



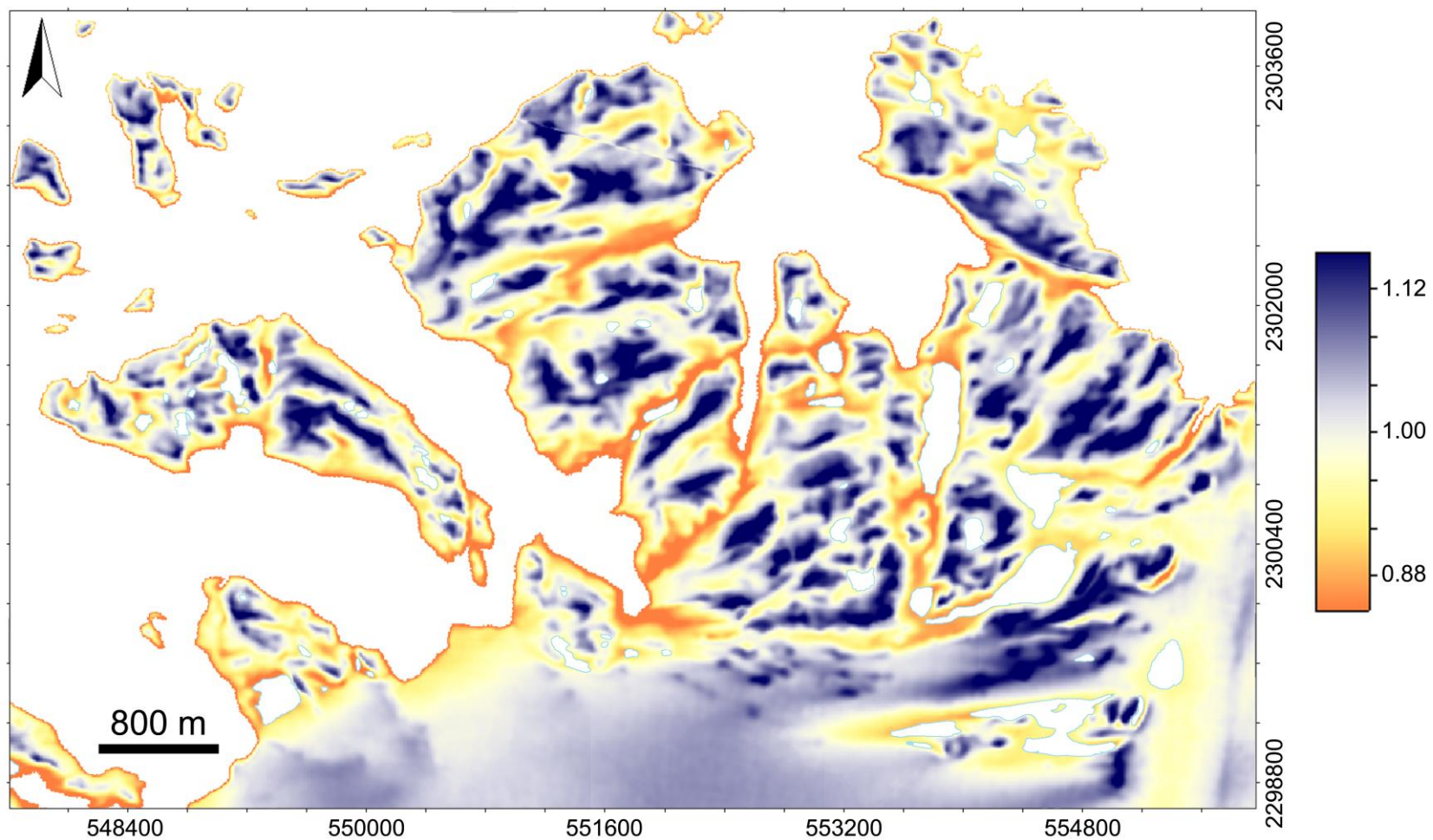
Водосборная площадь



Топографический индекс влажности



Индекс защищенности от ветра

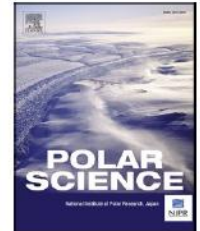




Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Polar Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/polar



Larsemann Hills: Geomorphometric modeling and mapping

I.V. Florinsky

Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290, Russia

ARTICLE INFO

Keywords:

Topography
Digital elevation model
Geomorphometry
Surface

ABSTRACT

Geomorphometric modeling is widely used in geosciences. However, geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases has not been performed so far. This article presents the first results of our work on geomorphometric modeling and mapping of the Larsemann Hills obtained in the frameworks of the 68th Russian Antarctic Expedition in January–April 2023. As input data, we used a fragment of the Reference Elevation Model of Antarctica (REMA). From the extracted and edited digital elevation model, we derived digital models and maps of the following 17 morphometric variables: slope, aspect, horizontal curvature, vertical curvature, mean curvature, Gaussian curvature, minimal curvature, maximal curvature, unsphericity curvature, difference curvature, vertical excess curvature, horizontal excess curvature, ring curvature, accumulation curvature, catchment area, topographic index, and stream power index. We also conducted a field geomorphometric interpretation work to provide correct physical geographic, geological, and geomorphological interpretations of morphometric maps. In the fieldwork, we carried out 54 foot routes with the total length of about 422 km. During the routes, we collected 150 rock samples for further petrological and mineralogical analyses as well as three-dimensional modeling of the samples. Derived morphometric maps can be useful for structural geological and process-oriented hydrological studies. The ultimate goal of the ongoing work is to create a large-scale geomorphometric atlas of Antarctic oases and other ice-free Antarctic territories.

Другие публикации по проекту

- Флоринский И.В. Проект геоморфометрического атласа свободных от оледенения территорий Антарктики // ИнтерКарто, ИнтерГИС. – 2024. – Т. 30. – № 2. – С. 53–79.
- Florinsky I.V., Zharnova S.O. Geomorphometry of the Bunger Hills, East Antarctica // *Advances in Polar Science*. – 2025. – Vol. 36. – No. 2. – P. 95–112.
- Florinsky, I.V., 2025. Geomorphometric atlas of ice-free Antarctic areas: Problem statement, concept, and key principles. arXiv:2508.02846 [physics.geo-ph], 33 p.
- Florinsky, I.V., and Zharnova, S.O., 2025. Ice-free geomorphometry of Enderby Land, East Antarctica: 1. Mountainous areas. Geomorphometric Modeling Group, IMPB KIAM RAS, Preprint GMG-0825-1. Zenodo.17009437, 203 p.
- Florinsky, I.V., and Zharnova, S.O., 2025. Ice-free geomorphometry of Enderby Land, East Antarctica: 2. Coastal oases. arXiv:2509.05141 [physics.geo-ph], 56 p.
- Florinsky, I.V., and Zharnova, S.O., 2025. Ice-free geomorphometry of Queen Maud Land, East Antarctica: 1. Sôya Coast. arXiv:2508.10462 [physics.geo-ph], 89 p.
- Florinsky, I.V., and Zharnova, S.O., 2025. Ice-free geomorphometry of Queen Maud Land, East Antarctica: 2. Prince Olav Coast. Research Square Preprints, rs-7428671, 57 p.
- Florinsky, I.V., 2023. Geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases. arXiv:2305.07523 [physics.geo-ph], 84 p.

Ведутся работы по созданию фундаментального картографического произведения – геоморфометрического атласа свободных от оледенения территорий Антарктики.

Атлас обладает целостностью благодаря его полноте и внутреннему единству.

Полнота атласа обеспечивается двумя факторами:

1. В атласе будут представлены все значимые территории Антарктики, свободные от ледникового покрова.
2. Для этих территорий строятся карты всех основных, научно значимых и интерпретируемых морфометрических характеристик рельефа.

Внутреннее единство атласа обеспечивается тремя факторами:

1. Серия морфометрических карт каждой территории создается в одном масштабе, что обеспечивает простоту сопоставления этих карт.
2. Для всех территорий рассчитываются серии карт одного набора морфометрических характеристик, что способствует сравнительному анализу рельефа различных территорий.
3. Каждая морфометрическая карта количественно описывает определенное свойство поверхности рельефа и обладает уникальной физико-математической и физико-географической интерпретацией. Морфометрические карты одной серии взаимно дополняют друг друга.

Атлас:

- Концентрирует мультимасштабную многоаспектную количественную информацию о рельефе свободных от оледенения территорий Антарктики
- Представляет ее в систематизированной, организованной и хорошо читаемой форме
- Обеспечивает научно-информационную поддержку фундаментальных и прикладных исследований Антарктики
- Способствует реализации геополитических интересов России в южном полярном регионе

iflor@mail.ru

<http://iflorinsky.impb.ru>