

**ДВАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ
КОСМОСА»**

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗЕРНЫХ ТЕРМОЦИРКОВ ЗАПАДНОЙ
СИБИРИ ПО ДАННЫМ ArcticDEM**

Алтухов М.И.

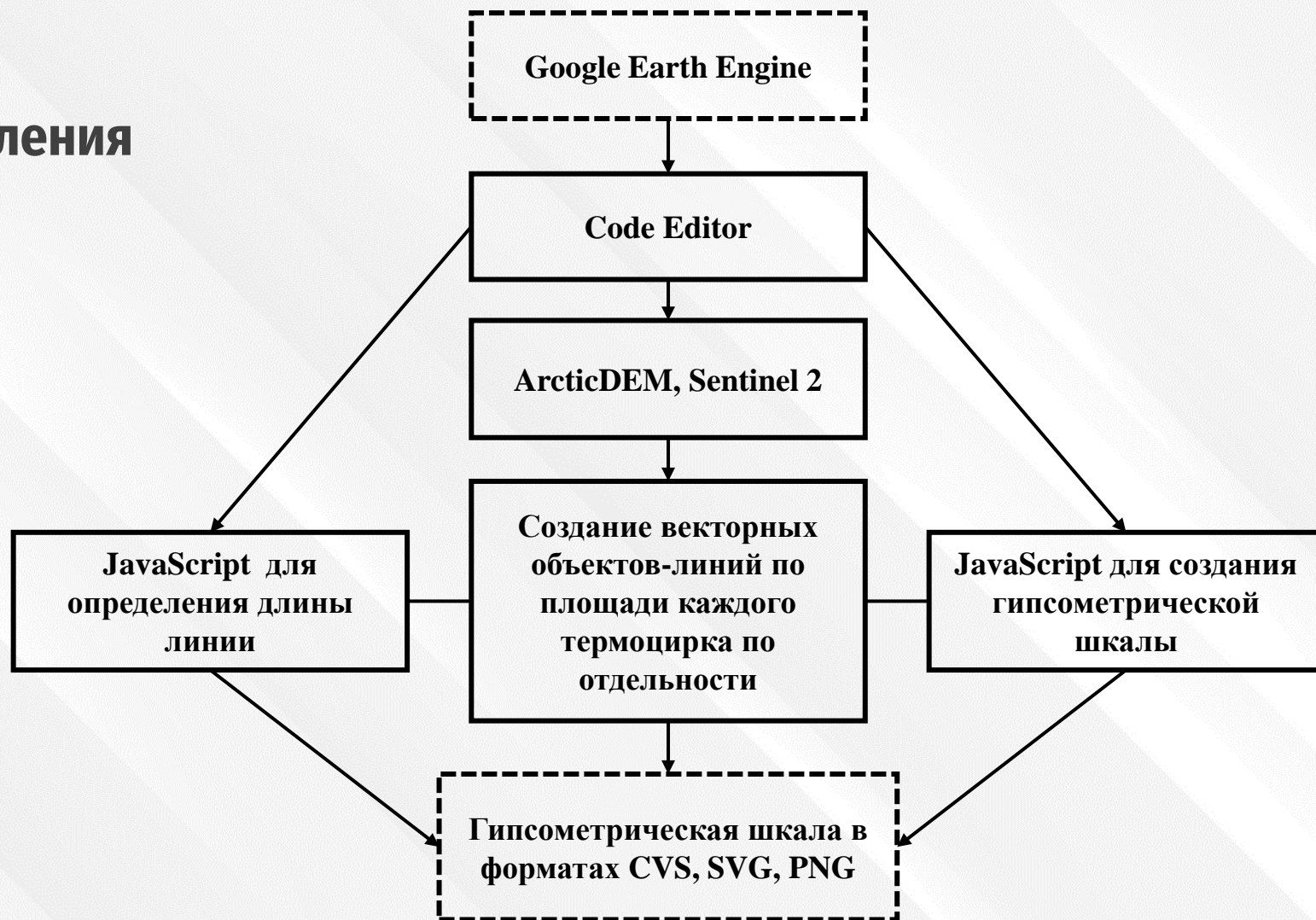
Нестерова Н.Б..

Лейбман М.О. (д.г.-м.н.)

Тюмень
2022 г.

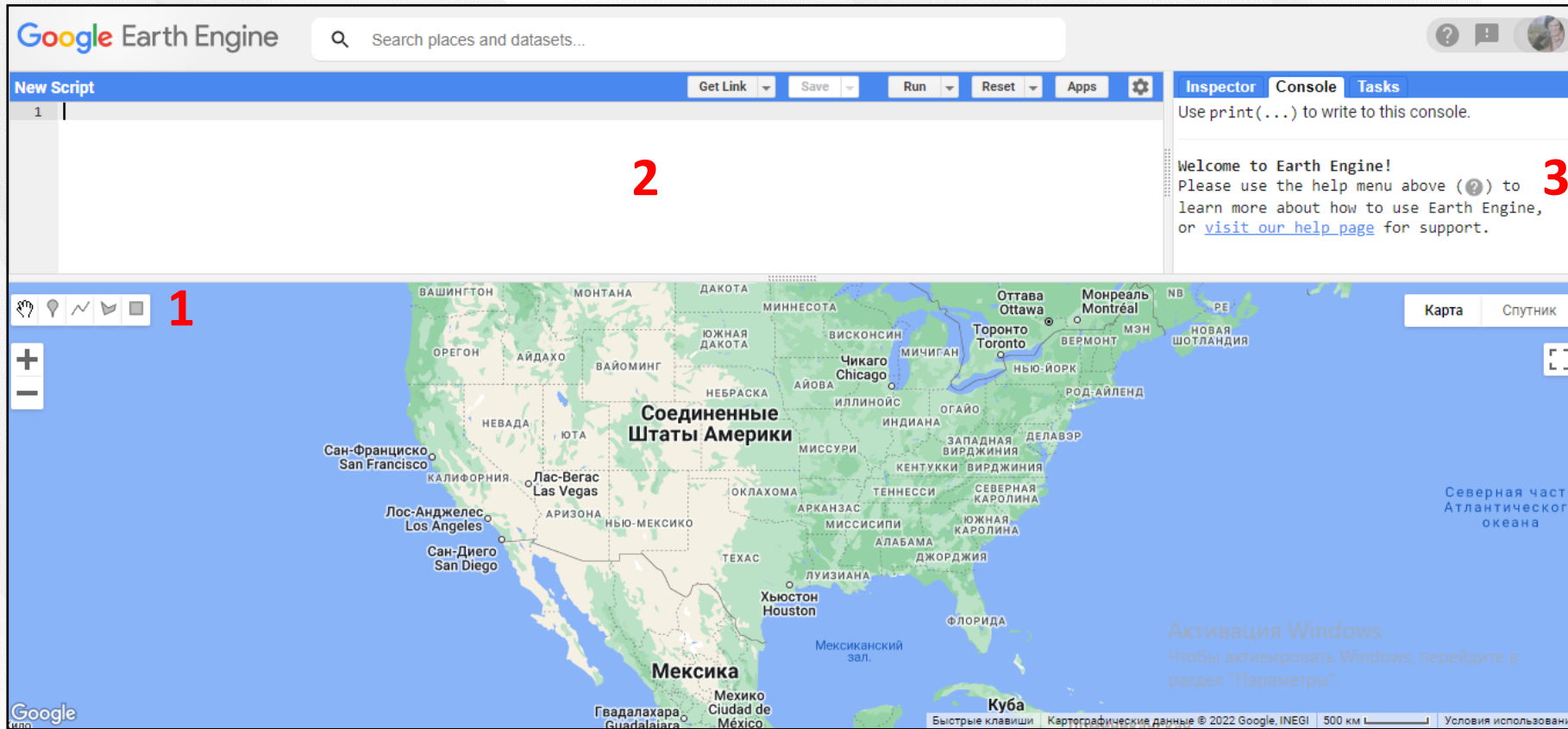
- Термоцирки (ТЦ) представляют собой образующиеся на склонах отрицательные формы рельефа, связанные с протаиванием залежей подземных льдов в областях сплошного распространения многолетнемерзлых пород;
- Развитие ТЦ очень динамично, связано с флуктуациями температуры воздуха в сочетании с другими климатическими и ландшафтными условиями и характеризуется цикличностью.
- Изучение динамики ТЦ представляет огромный интерес так как с ними связаны значительные изменения рельефа, геокриологических условий, геоботанических, гидрологических, геохимических свойств окружающих ландшафтов, а также круговорот углерода;
- Север Западной Сибири характеризуется широким развитием пластовых льдов и их неглубоким залеганием, обуславливающим широкое распространение ТЦ. Полевые исследования на ключевых участках отмечают активизацию термоденудации как ведущего процесса образования ТЦ после аномально высоких температур воздуха летом 2012 г. При этом в региональном масштабе для всего севера Западной Сибири характеристики термоцирков до сих пор неизвестны. Данные дистанционного зондирования Земли позволяют изучать ТЦ на обширных территориях.

Общая схема определения морфометрических характеристик



CODE EDITOR

Code Editor – интерактивная среда разработки Google Earth Engine на JavaScript API (<https://code.earthengine.google.com>). Все действия по обработке данных выполнялись в редакторе кода с помощью JavaScript и встроенных инструментов создания и редактирования векторных объектов (рис.1)



1 – Инструменты создания и редактирования векторных объектов

2 – Окно для ввода скриптов

3 – Окно вывода результатов

Рис.1. Среда Code Editor

В работе использовалась цифровая модель рельефа ArcticDEM 2016 года, находящаяся в свободном доступе на облачной платформе Google Earth Engine (GEE). Мозаика растров цифровой модели рельефа имеет разрешение 2 метра. На рисунке 2 представлены метаданные ArcticDEM с каталога данных Google Earth Engine (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UMN_PGC_ArcticDEM_V3_2m_mosaic). На рисунке 3 – JavaScript для визуализации данных в фрейме Code Editor

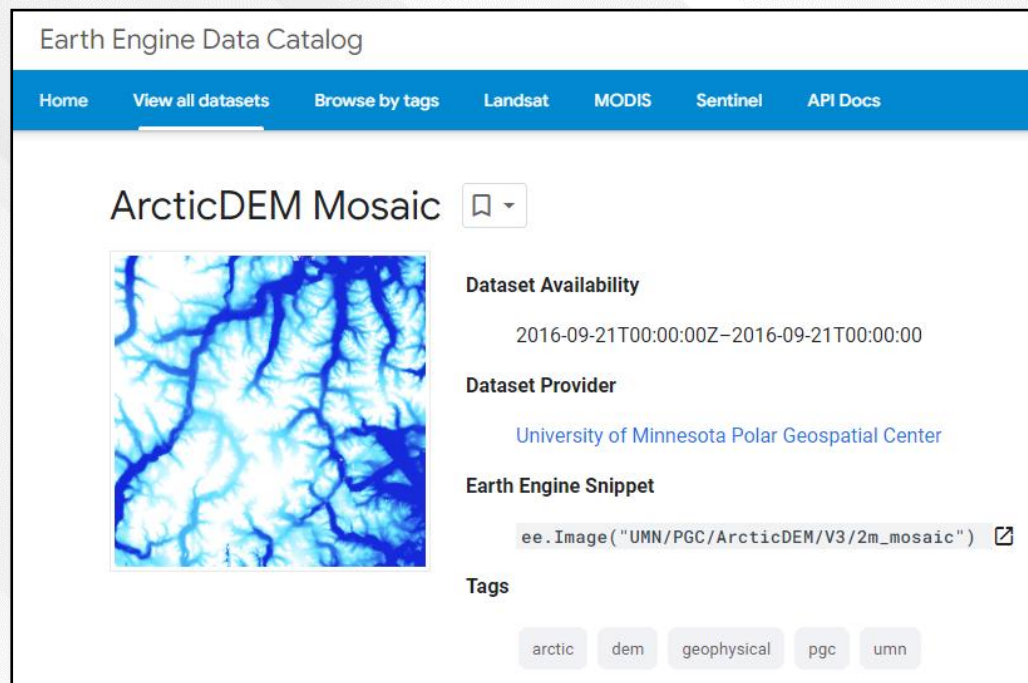


Рис.2. Метаданные ArcticDEM

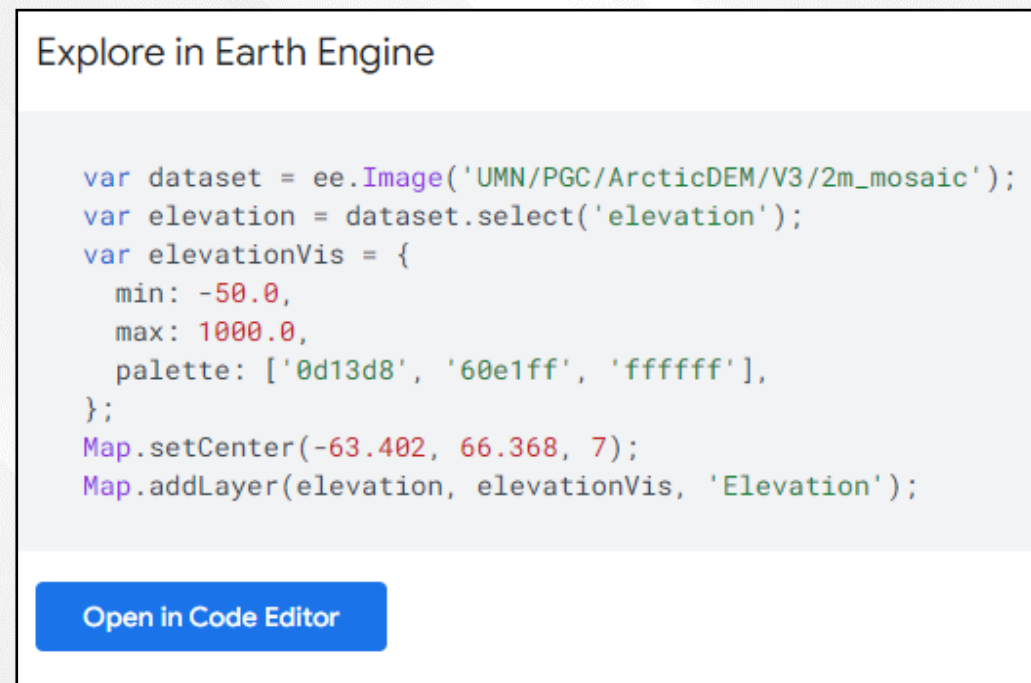



Рис.3. JavaScript для визуализации

Дополнительно для визуального дешифрирования границ термоцирков была использована мозаика снимков Sentinel-2 за август 2016 года (соответственно дате ArcticDEM) . Данные были получены аналогично ArcticDEM, в каталоге Google Earth Engine (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2)

Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C 🔍



Dataset Availability
2015-06-23T00:00:00Z–2022-11-12T14:02:51

Dataset Provider
[European Union/ESA/Copernicus](#)

Earth Engine Snippet
`ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2")` 🔗

Tags

[copernicus](#) [esa](#) [eu](#) [msi](#) [radiance](#) [sentinel](#)

Рис.4. Метаданные Sentinel-2

```
Explore in Earth Engine

/**
 * Function to mask clouds using the Sentinel-2 QA band
 * @param {ee.Image} image Sentinel-2 image
 * @return {ee.Image} cloud masked Sentinel-2 image
 */
function maskS2clouds(image) {
  var qa = image.select('QA60');

  // Bits 10 and 11 are clouds and cirrus, respectively.
  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;

  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

  return image.updateMask(mask).divide(10000);
}

// Map the function over one month of data and take the median.
// Load Sentinel-2 TOA reflectance data.
var dataset = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterDate('2018-01-01', '2018-01-31')
  // Pre-filter to get less cloudy granules.
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
  .map(maskS2clouds);

var rgbVis = {
  min: 0.0,
  max: 0.3,
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
};

Map.setCenter(-9.1695, 38.6917, 12);
Map.addLayer(dataset.median(), rgbVis, 'RGB');
```

[Open in Code Editor](#)

Рис.5. JavaScript для визуализации

JAVASCRIPT ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ArcticDEM И SENTINEL-2

7

```
1 var dataset = ee.Image('UMN/PGC/ArcticDEM/V3/2m_mosaic');
2 var elevation = dataset.select('elevation');
3 var elevationVis = {
4   min: -50.0,
5   max: 1000.0,
6   palette: ['0d13d8', '60e1ff', 'ffffff'],
7 };
8 function maskS2clouds(image) {
9   var qa = image.select('QA60')
10  var cloudBitMask = 1 << 10;
11  var cirrusBitMask = 1 << 11;
12  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0).and(
13    qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0))
14  return image.updateMask(mask).divide(10000)
15    .select("B.*")
16    .copyProperties(image, ["system:time_start"])
17 }
18 var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
19   .filterDate('2016-07-01', '2016-10-28')
20   .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
21   .map(maskS2clouds)
22 var composite = collection.median()
23
24 Map.addLayer(composite, {bands: ['B4', 'B3', 'B2'], min: 0, max: 0.3}, 'RGB')
25 Map.addLayer(elevation, elevationVis, 'Elevation');
```

Рис.6. JavaScript для визуализации

Строки 1-7 – Добавление и настройка параметров отображения ArcticDEM;
Строки 8-17 – Фильтрация снимков Sentinel 2 по облачности (не более 10%);
Строки 18-19 – Выбор снимков из общей коллекции и фильтрация по дате;
Строки 20-22 – Применение заданных параметров облачности;
Строка 24 – визуализация в комбинации каналов «Натуральные цвета»;
Строка 25 – визуализация ArcticDEM.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ArcticDEM

При визуализации на некоторых частях растра есть «дыры», но территория исследования – север Западной Сибири, не имеет дефектов мозаики

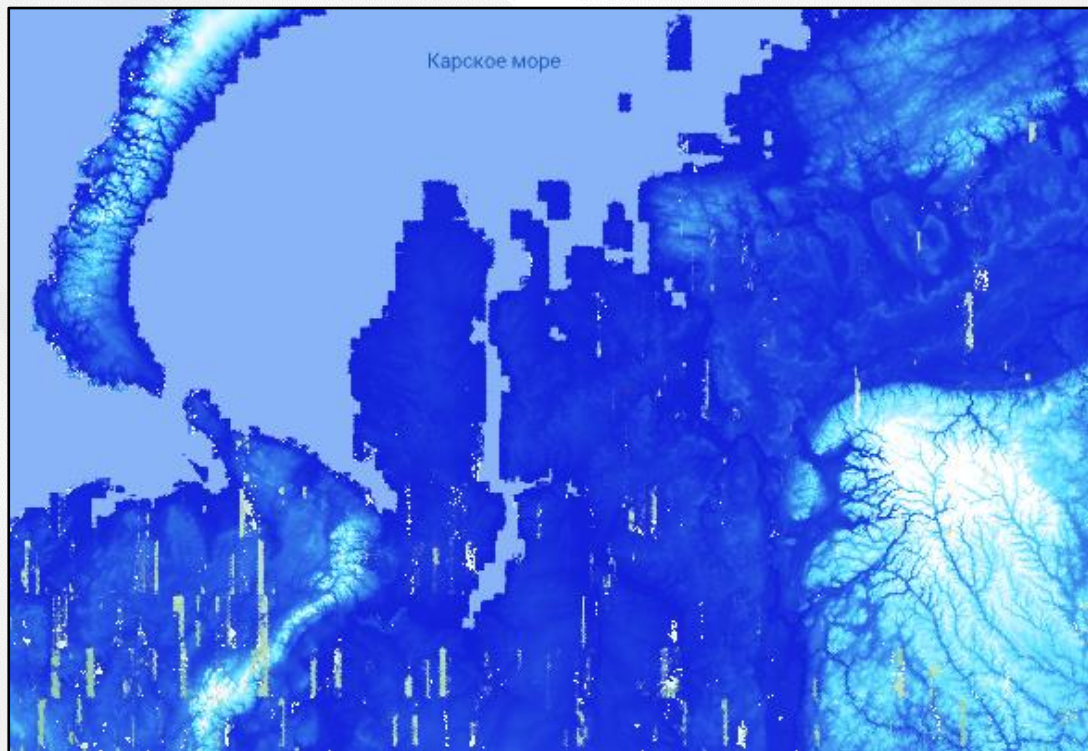


Рис.7. Результат визуализации (М 1:2 000 000)



Рис.8. Результат визуализации (М 1:100 000), Ямал



Рис.9. Результат визуализации (М 1:2 000 000)



Рис.10. Результат визуализации (М 1:100 000),
Ямал

СОЗДАНИЕ ВЕКТОРНЫХ ОБЪЕКТОВ

10

Для каждого термоцирка проводились две гипсометрические транссекты (линии) по самым широким частям термоцирка от береговой линии озера до бровки ТЦ



Рис.11. Первая линия транссекты



Рис.12. Вторая линия транссекты

После создания векторной геометрии, на ее основе, с помощью JavaScript, написан алгоритм построения гипсометрической шкалы с возможностью изменения ее визуальных параметров и экспорта на компьютер

```
28 var lineString = geometry;
29 var linLen = lineString.length();
30 print('Длина линии, метры', linLen);
31
32 var CrossSection = geometry;
33 var numbPoints = 130;
34
35 var point1 = ee.List(geometry.coordinates().get(0));
36 var point2 = ee.List(geometry.coordinates().get(1));
37 var XmapList = ee.List.sequence(point1.get(0), point2.get(0), null, numbPoints);
38 var YmapList = ee.List.sequence(point1.get(1), point2.get(1), null, numbPoints);
39
40 var points = ee.FeatureCollection(XmapList.map(function(Xcoord){
41   var Ycoord = YmapList.get(XmapList.indexOf(Xcoord));
42   return ee.Feature(ee.Geometry.Point([Xcoord, Ycoord]));
43 }));
44
45 var elevation = dataset.reduceRegions(points, ee.Reducer.first(), 20);
46
47 var profile = ui.Chart.feature.byFeature(elevation);
48 profile.setOptions({
49   "title": 'Гипсометрическая шкала (Термоцирк ID: 277, 430, 431)',
50   "vAxis": {
51     title: 'Высота (метры)',
52     titleTextStyle: {italic: false, bold: true},
53     gridlines: {color: '000000'}},
54   "hAxis": {
55     title: 'Расстояние (метры)',
56     titleTextStyle: {italic: false, bold: true},
57     gridlines: {color: '000000'}},
58   series: {
59     0: {linewidth: 2, color: 'E37D05', pointSize: 0},
60   },
61   chartArea: {backgroundColor: 'FFFFFF'}
62 });
63 print(profile);
```

Строки 32-33– Указание геометрии как элемента для считывания данных о высотах и задание её длины (важный пункт, см. слайд 12);

Строки 35-44 – Задание параметров осей построения шкалы;

Строка 45 – Указание шага 2 метра, в соответствии с разрешением ArcticDEM;

Строки 47-62 – Визуальные параметры шкалы (название, цвет и т.д.);

Строка 63 – Вывод результатов в консоль.

Рис.13. Вторая линия трансекты

Определение длины линии-трансекты необходимо для параметра в строке 33 на слайде 11. Данный параметр отвечает за протяженность считывания параметров высот по осям, а также за визуальное отображение шкалы в итоговом результате. Параметр необходимо каждый раз подставлять вручную

```
28 var lineString = geometry;
29 var linLen = lineString.length();
30 print('Длина линии, метры', linLen);
31
32 var CrossSection = geometry;
33 var numbPoints = 130;
34
35 var point1 = ee.List(geometry.coordinates().get(0));
36 var point2 = ee.List(geometry.coordinates().get(1));
37 var XmapList = ee.List.sequence(point1.get(0), point2.get(0), null, numbPoints);
38 var YmapList = ee.List.sequence(point1.get(1), point2.get(1), null, numbPoints);
39
40 var points = ee.FeatureCollection(XmapList.map(function(Xcoord){
41   var Ycoord = YmapList.get(XmapList.indexOf(Xcoord));
42   return ee.Feature(ee.Geometry.Point([Xcoord, Ycoord]));
43 }));
44
45 var elevation = dataset.reduceRegions(points, ee.Reducer.first(), 20);
46
47 var profile = ui.Chart.feature.byFeature(elevation);
48 profile.setOptions({
49   "title": 'Гипсометрическая шкала (Термоцирк ID: 277, 430, 431)',
50   "vAxis": {
51     title: 'Высота (метры)',
52     titleTextStyle: {italic: false, bold: true},
53     gridlines: {color: '000000'}},
54   "hAxis": {
55     title: 'Расстояние (метры)',
56     titleTextStyle: {italic: false, bold: true},
57     gridlines: {color: '000000'}},
58   series: {
59     0: {lineWidth: 2, color: 'E37D05', pointSize: 0},
60   },
61   chartArea: {backgroundColor: 'FFFFFF'}
62 });
63 print(profile);
```

Строки 28-30 – Расчет длины линейной геометрии и вывод результатов в КОНСОЛЬ.

Рис.14. Вторая линия трансекты

Результатом выполнения описанных выше этапов являются гипсометрические шкалы, созданные отдельно для каждой из двух трансект проводимых по площади ТЦ, отображающая оси высоты и длины, линию перепадов высот. Также, дополнительно, имеется возможность сразу же экспортировать шкалу в формат PNG, CVS (Excel-таблица, содержащая показатель расстояния и, через запятую, соответствующее ему значение высоты) и SVG (который, в данном случае, не экспортировался).

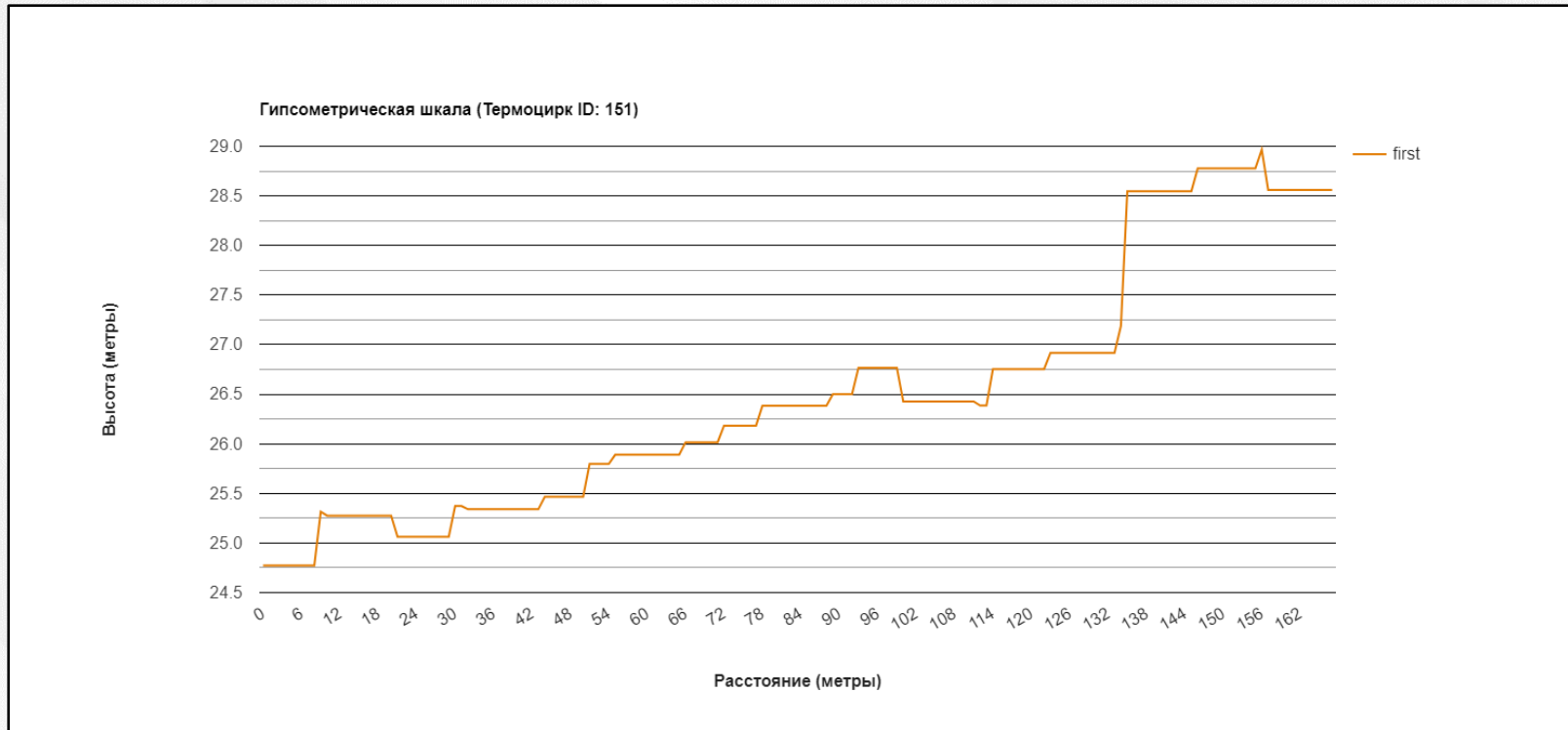


Рис.15. Гипсометрическая шкала по линии на слайде 10

	A	B	C
1	system:index,first		
2	0,24.774		
3	2,24.774		
4	4,24.774		
5	6,24.774		
6	8,24.774		
7	10,24.774		
8	8,24.774		
9	10,24.774		
10	12,24.774		
11	14,25.315		
12	16,25.275		

Line1

Рис.16. Пример содержания Excel-таблицы

- Впервые собраны морфометрические характеристики более ста термоцирков внутренних равнин севера Западной Сибири, приуроченных к озерам;
- Возможность оценить перепады высот между бровкой и самой нижней частью ТЦ;
- Возможность охарактеризовать морфометрические особенности большого количества термоцирков на обширной территории;
- Самый маленький перепад – 0, 2 метра, самый большой – 5, 6 метров;
- Средняя высота бровки – 26, 8 метров.

1. Morin, Paul, et al. "ArcticDEM; a publically available, high resolution elevation model of the Arctic." Egu general assembly conference abstracts. 2016.
2. Nesterova N.B., Khomutov A.V., Leibman M.O., Safonov T.A., Belova N.G. (2021). The inventory of retrogressive thaw slumps (thermocirques) in the north of west siberia based on 2016-2018 satellite imagery mosaic. Earth's Cryosphere, 25 (6). doi: 10.15372/KZ20210604

Исследования ведутся при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00644 «Исследование динамики термоцирков севера Западной Сибири методами обработки данных дистанционного зондирования Земли: современное распространение и ретроспективный анализ».