

# Использование контуров береговых линий со спутниковых изображений Sentinel-2 для построения моделей прибрежного рельефа

Алексей Евгеньевич Хмельнов, Т.Ф. Хмельнова

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова  
Сибирского отделения  
Российской академии наук  
(ИДСТУ СО РАН)  
<http://idstu.irk.ru>

27 августа 2025

SDM-2025, Белокуриха

## Задача построения 3D моделей прибрежного рельефа

Требуется объединить информацию о наземном и подводном рельефе.

Много источников информации о наземном рельефе, но очень мало о подводном.

# Модель прибрежного рельефа

## Использование:

- Оценка последствий изменения уровня воды на прибрежные и подводные объекты (водозаборы, пристани, строения);
- Моделирование процессов затопления/обмеления.

**Для таких проектов требуется наибольшая точность именно этой части модели рельефа.**

## Источники информации о подводной части рельефа:

- лоции, карты – неточно, недостаточный шаг изобат (например, на лоции 2 м, 5 м и всё);
- многолучевой эхолот – для него мелко;
- эхолот и т.п. – требует посещения каждой измеряемой точки, долго;
- анализ спутниковых снимков для определения глубин по цвету воды и т.п. – м.б. нужны снимки высокого разрешения, требуется подбор большого числа параметров;
- контура береговых линий при различных уровнях воды;
- топобатиметрический лидар – око видит, да зуб неймёт.

# Данные ДЗЗ среднего разрешения для исследования прибрежного рельефа

- Позволяют получить наиболее широкий охват территории.
- Съёмка такими спутниками, как Sentinel 2 и Landsat выполняется *регулярно*, и такие данные распространяются *свободно* при разрешении 10 м/пиксел для основных каналов.
- Может показаться, что такого разрешения не хватит, для решения рассматриваемой задачи. Покажем, что **это не так**.

# Контура береговых линии

Могут рассматриваться, как изолинии прибрежного рельефа.

при следующих условиях:

- уровень воды должен быть постоянен вдоль береговой линии в каждый момент времени – озеро, водохранилище. Иначе, для правильной интерпретации контуров береговых линий рек требуется модель течения (такое мы пока не делали);
- волнением можно пренебречь;
- приливы и сейши малы (так, для Байкала приливы до 32 мм и сейши до 60 мм – существенно меньше волнения);
- отсутствие льда и снега (снимки за позднюю осень, зиму, и почти всю весну не подходят, а как раз к концу весны уровни водохранилищ снижаются максимально);
- наличие колебаний уровня воды с течением времени (чем больше – тем лучше) – получаем несколько изолиний для разных уровней;
- наличие гидропостов и информации от них.

## Обнаружение береговых линий

Сначала рассмотрим ранее полученные результаты.

# Традиционный подход к выделению береговых линий

## Шаги обработки снимка

- 1 Вычислить растр NDWI (Normalized Difference Water Index) (для Sentinel-2 используем каналы  $B03$  – Green и  $B08$  – Visible and Near Infrared:  $NDWI = \frac{B03 - B08}{B03 + B08}$ );
- 2 Выполнить бинаризацию растра NDWI по порогу;
- 3 Векторизовать бинаризованный растр – получаем ступенчатые линии (┘);
- 4 Сгладить линии по некоторому порогу (↘).

## Пример результатов



После анализа полученных таким образом контуров был сделан вывод о **недостаточной точности** растров с разрешением 10 м/пиксель для решения задачи отслеживания изменений береговых линий.

## Основная проблема

**Изменение яркости** любого пикселя **не влияет** на положение контура, пока это значение не перейдёт порог.

# Наш подход: выделение изолиний без бинаризации

## Шаги обработки снимка

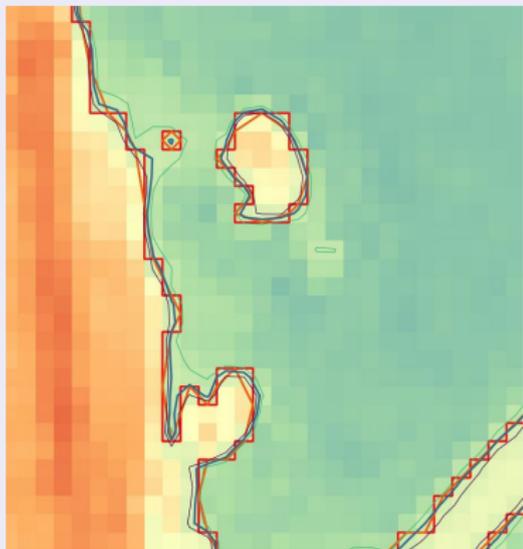
- 1 Вычислить растр NDWI (Normalized Difference Water Index) (для Sentinel-2 используем каналы *B03 – Green* и *B08 – Visible and Near Infrared*):  
$$NDWI = \frac{B03 - B08}{B03 + B08};$$
- 2 Построить изолинии растра NDWI с шагом 0.05 от 0.0 до 0.25; (`gdal_contour`) (✓);
- 3 Выбрать наилучший порог (обычно 0.1).

В результате получаем субпиксельный уровень точности, превышающий 10 м.

## Основное преимущество

Любое **изменение яркости** пикселя на границе областей **влияет** на положение контура.

## Сравнение результатов



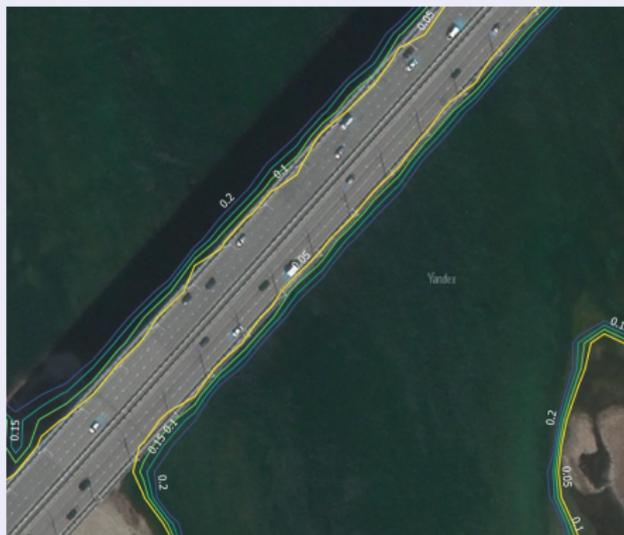
# Изолинии растра NDWI в районе моста

Наиболее подходящий порог можно выбрать по объектам, имеющим чёткую границу с водой при любом направлении съёмки:

на фоне ТСИ



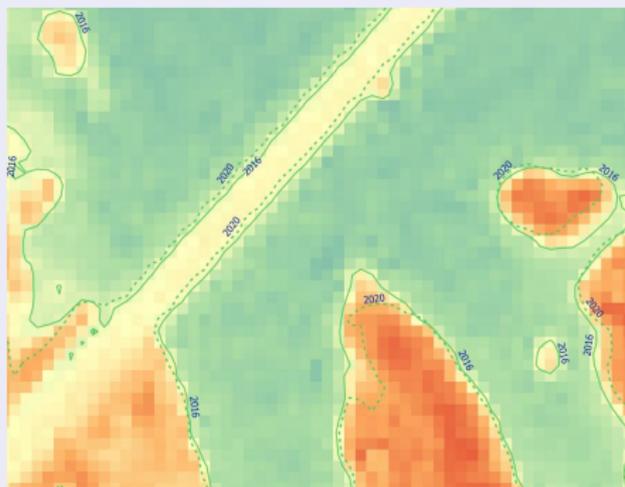
на фоне Яндекс Спутник



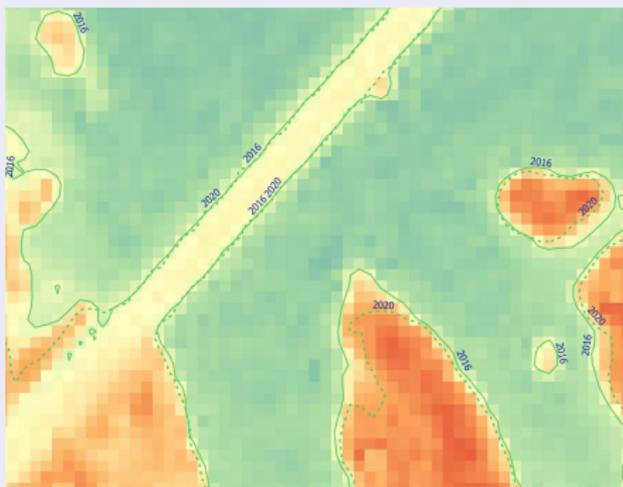
## Точность горизонтального позиционирования

Её оказалось недостаточно для работы на субпиксельном уровне. Пример: 2016 г. – сплошная линия, уровень воды ниже, 2020 г. – пунктир, уровень воды выше.

Исходное положение



Пунктир сдвинут вручную



При проектировании Sentinel-2 были заданы требования по точности геопозиционирования продуктов уровня 1 ( $2\sigma$ ): 20 м без использования наземных реперных точек и 12,5 м при их использовании. С марта 2021 г. её среднюю абсолютную величину удалось сократить до 6 м.

С учётом разных возможных направлений съёмки со спутника на изображениях нет надёжных ориентиров, позволяющих найти сдвиг.

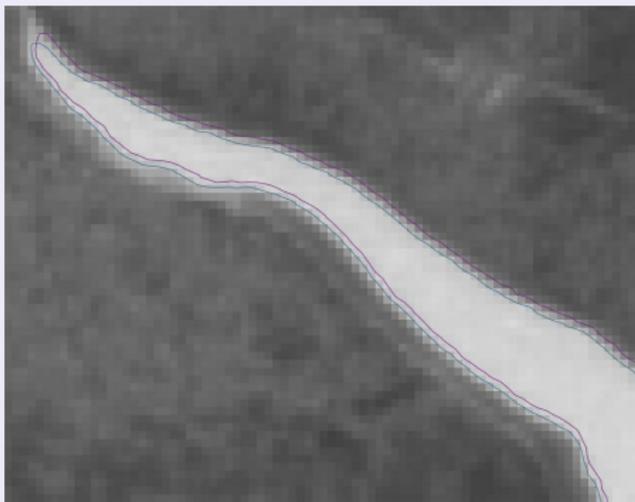
# Векторный алгоритм поиска наилучшего сдвига

- 1: Выбрать объект  $F_t$  целевой карты, имеющий наибольшее пересечение с исходной
- 2: Выбрать наибольший объект  $F_s$  исходной карты среди достаточно близких к  $F_t$
- 3:  $Shift \leftarrow 0$
- 4: **for**  $step \in 1..MaxSteps$  **do**
- 5:      $N \leftarrow 0$ ;  $Sum_{\Delta} \leftarrow 0$
- 6:     **for all**  $P_s \in F_s$  **do**
- 7:          $P_t \leftarrow ClosestPoint(F_t, Shift + P_s)$
- 8:         **if**  $Distance(P_t, P_s) \leq D_{max}$  **then**
- 9:              $N \leftarrow N + 1$
- 10:              $Sum_{\Delta} \leftarrow Sum_{\Delta} + P_t - P_s$
- 11:         **end if**
- 12:     **end for**
- 13:      $\Delta \leftarrow Sum_{\Delta} / N$
- 14:      $Shift \leftarrow Shift + rate * \Delta$
- 15:     **if**  $|\Delta| < \Delta_{max}$  **then**
- 16:         **break**
- 17:     **end if**
- 18: **end for**

# Пример работы алгоритма

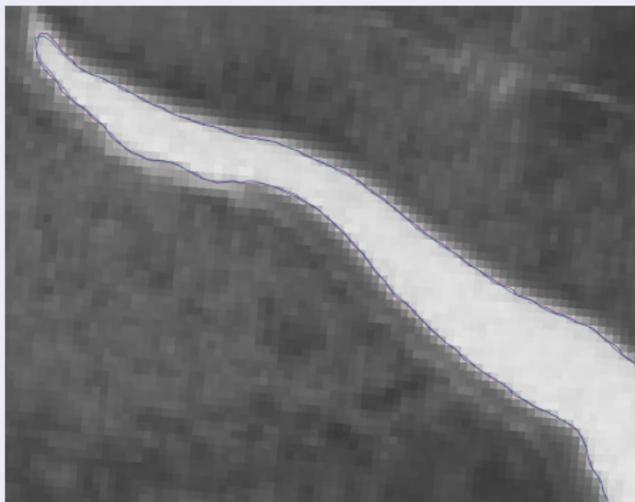
Использованы пересекающиеся изображения в разных проекциях (WGS 84/UTM zone 47N и WGS 84/UTM zone 48N) для разных моментов времени: 20180827 (уровень 396.41 м, синяя линия) и 20180825 (уровень 396.32 м, фиолетовая), изолинии на уровне 0.1, сдвиг (3.63 м, 8.86 м) найден за 15 шагов.

Исходное положение



на фоне NDWI для 20180827

Результат сдвига



на фоне NDWI для 20180825

## Исходные данные

Далее рассмотрим результаты, полученные в 2024 г.

# Объект исследования - Братское водохранилище

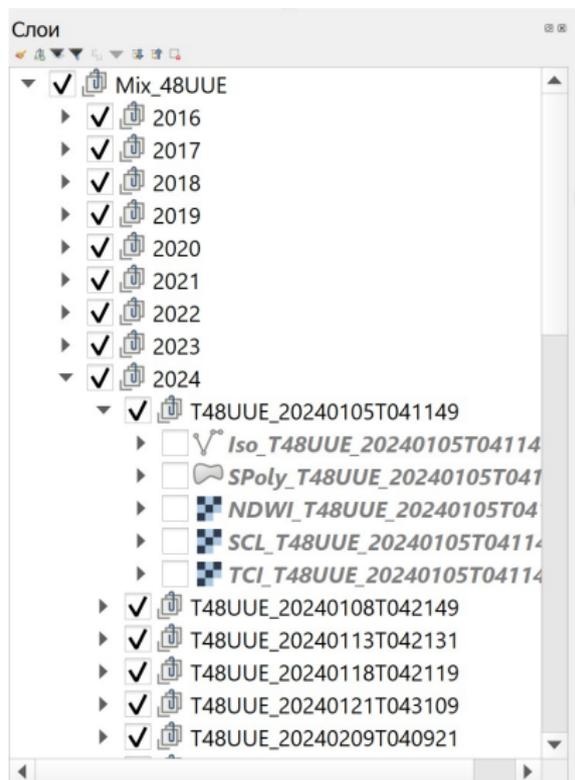
## Диапазон колебаний уровня Братского вдхр. (ТО)

Год	min	Дата min	max	Дата max
2013	398.42	31.12.2013	399.54	12.09.2013
2014	396.62	31.12.2014	398.4	01.01.2014
2015	395.84	12.04.2015	396.93	05.09.2015
2016	395.58	02.04.2016	397.75	11.09.2016
2017	395.05	04.07.2017	396.25	04.01.2017
<b>2018</b>	<b>394.52</b>	<b>10.04.2018</b>	396.65	12.10.2018
2019	395.89	11.03.2019	400.02	11.10.2019
2020	397.32	28.04.2020	400.6	05.11.2020
<b>2021</b>	398.3	25.03.2021	<b>402.03</b>	<b>31.08.2021</b>
2022	399.32	07.04.2022	401.28	29.09.2022
2023	398.02	29.04.2023	402.01	12.10.2023
2024	398.89	02.04.2024	401.33	29.11.2024

## Copernicus DEM, 48UUE



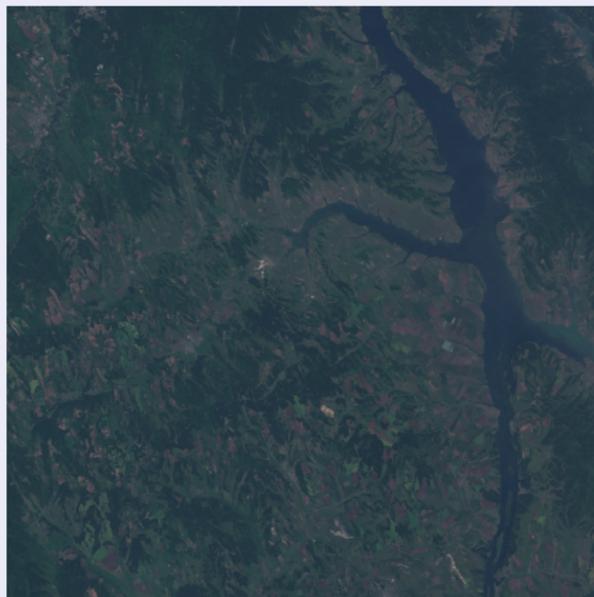
# Исходные данные по трапеции 48UUE



Всего 461 снимок с облачностью менее 30%, 428 обработалось до L2A.

# Использование L2A вместо L1C

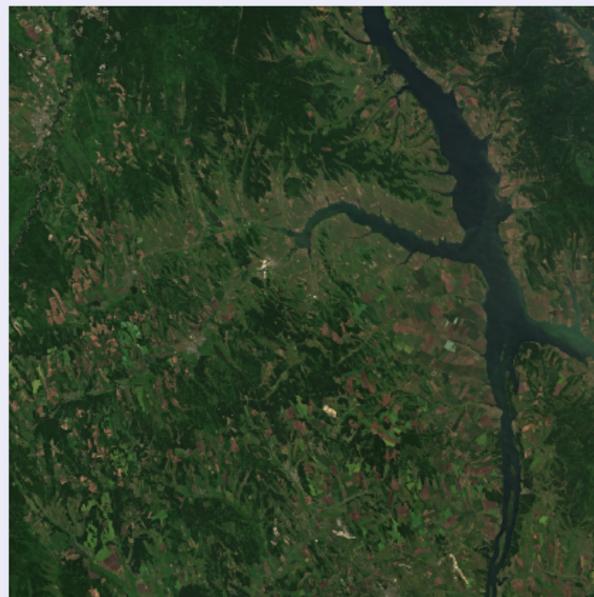
Уровень обработки L1C



$$\vec{\sigma} = (13.2, 8.4, 5.8)$$

Разные лучшие уровни NDWI для разных снимков (0.1, 0.15, 0.05, 0.00).

Уровень обработки L2A



$$\vec{\sigma} = (23.9, 17.0, 12.2)$$

Лучший уровень NDWI  $\equiv 0$ .

# Массовая обработка изображений Sentinel-2 до L2A

Реализована массовая параллельная обработка изображений Sentinel-2, которые распространяются с уровнем обработки L1C, до уровня обработки L2A.

## Детали реализации

- Используется программа `sen2cor v2.12`, исправленная для устранения ошибок, препятствующих параллельной работе нескольких её экземпляров на одном компьютере
- Файлы предварительно копируются на диск в памяти, обрабатываются там
- Параллельно работают до 9 потоков при 128 ГБ ОЗУ (68 ГБ занимает диск в памяти)
- Есть версии для Windows и Linux

## Результат

- Получается обработать до уровня L2A на компьютере со 128 ГБ оперативной памяти и 12-ядерным процессором AMD Ryzen 9 5900X все полученные с 2017 года достаточно безоблачные изображения для одного тайла (всего 300-500 изображений) за 10-20 часов
- Все хранящиеся на нашем геопортале изображения Sentinel-2 (в основном на БПТ) были обработаны до L2A за несколько месяцев на нескольких компьютерах

## Взаимная регистрация растров Sentinel с субпиксельной точностью

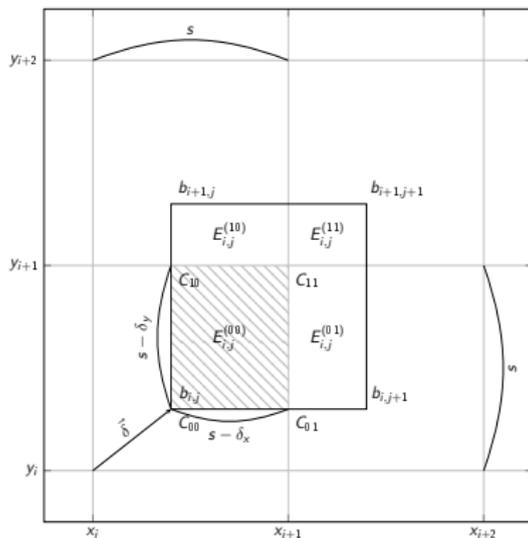
Задача поиска наилучшего сдвига относится к задачам взаимной регистрации снимков.

Для массовой обработки нескольких сотен снимков требуется максимально автоматизировать работу с ними, включая задачу взаимной регистрации снимков.

Выбираем эталонный качественный безоблачный снимок, покрывающий всю трапецию, для остальных находим субпиксельный сдвиг, минимизирующий отклонение между этими изображениями (сравниваем растры NDWI).

# Растровый алгоритм поиска наилучшего сдвига в SubPxAlign

- 1 Используем билинейную интерполяцию для сопоставления функций изображениям.
- 2 Для 4-х возможных направлений сдвига  $\vec{\delta}$  (4-х квадрантов с учётом знаков по  $\delta_x$  и  $\delta_y$ ) в символьном виде могут быть найдены выражения для функции ошибок  $E(\vec{\delta})$  – интеграла квадрата разности кусочно-билинейных функций. Это – полиномы до 6-й степени от  $x$  и  $y$  (при поиске и  $\beta, \kappa$ ). Вычисляются по необходимости (при попадании в квадрант).
- 3 По этим выражениям в символьном виде находим  $\nabla E(\vec{\delta})$ .
- 4 Используем метод градиентного спуска для поиска минимума  $E(\vec{\delta})$ . При переходе между квадрантами вычисляем, если требуется, соответствующее выражение и переключаемся на него.
- 5 Останавливаемся при  $|\nabla E(\vec{\delta})| < \epsilon$  или достижении макс. числа шагов.



Дополнительно есть версия алгоритма с компенсацией различий в освещённости, где минимизируется  $E(\vec{\delta}, \beta, \kappa)$ . Здесь  $\beta, \kappa$  – параметры линейного преобразования яркости одного из сопоставляемых изображений:  $b'_{i,j} = \beta + \kappa * b_{i,j}$ .

# Выражения, найденные SubPxAlign для T48UUE\_20240708T040551

Сохранённые выражения (могут использоваться повторно):

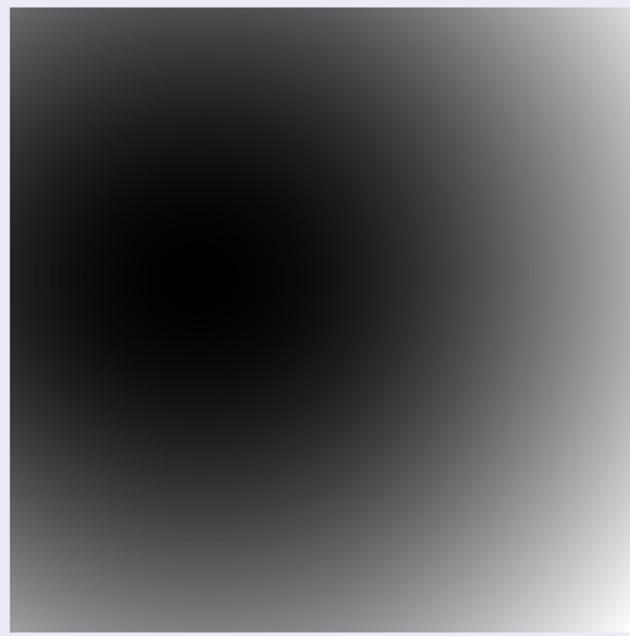
```
[Stat]
N=120560400
StdDev=0.271677229140943
Avg=-0.582235551398922
[Common]
K2=739283.38846551+2.02679075300694E-7 x+3.42610292136669E-7 y-3.55415977537632E-7 xy+8.34211277833674E-9 x^2
+8.31437318993267E-9 y^2+4.12683220929466E-10 x^2y+5.11363396071829E-10 xy^2+7.00936197972624E-10 x^2y^2
-5.00222085975111E-12 y^3-5.21822585142218E-11 xy^3-2.8421709430404E-14 x^3y^2+7.67954588809516E-11 x^2y^3
BK=-3547778.11140287+5.355104804039E-8 x+2.37487256526947E-8 y-2.1420419216156E-8 xy
[QBr_PP]
C=2116369.70940294+153.825621662196 x-1.68224826967344 y-0.269937043543905 xy-2.00181744682095 x^2
-0.955998971988038 y^2-0.0185591053859753 x^2y-0.235138087444284 xy^2-0.234373223700118 x^2y^2
-0.600977290072251 x^3-0.213211352764802 y^3+0.0148746159923121 x^3y+0.0417452624478756 xy^3
+0.0248630228566071 x^3y^2+0.0585214389278121 x^2y^3-0.0140638672273781 x^3y^3
K=-2293342.56537409-787.410250001587 x+31.8354816874489 y-123.718678183854 xy+1076.98427495172 x^2+971.089128194488 y^2
-14.1277289391873 x^2y+166.93477479044 xy^2-259.802278012192 x^2y^2-72.9974141541016 x^3-185.051087245929 y^3
+18.3593959497109 x^3y-36.714620963039 xy^3+26.955319884062 x^3y^2+71.7230446865926 x^2y^3-10.5358951465273 x^3y^3
B=6365324.24633318+329.727485254407 x+178.580554038286 y+3.56609981134534 xy-7.18319184100255 x^2-1.83293555909768 y^2
-1.15766289832028 x^2y-0.653497886843979 xy^2-0.130291500594467 x^2y^2
Area=5348733
[QBr_NP]
C=2116371.24524651+153.283116967417 x-1.48545875167474 y+1.31264934595674 xy-1.54820500330538 x^2+0.0456417236130164 y^2
-0.891105568790181 x^2y-0.727847846824943 xy^2+0.439932930815075 x^2y^2-0.594194679965995 x^3-0.0960242982341697 y^3
-0.0216604248596468 x^3y-0.0422969058138278 xy^3+0.00809840331334044 x^3y^2-0.0024397988171927 x^2y^3+0.00677941140315852 x^3y^3
K=-2292587.90505591-548.617014480289 x-1357.0589801399 y-301.823036057875 xy+897.635076959834 x^2+418.301519146808 y^2
+305.846754925621 x^2y+10.9850414394818 xy^2-59.5181869355456 x^2y^2-69.4485426644302 x^3+184.097141226836 y^3
-20.4206362853619 x^3y+52.0447583487139 xy^3+11.8352621527204 x^3y^2-66.9793699980364 x^2y^3+5.03650264323498 x^3y^3
B=6365145.89793244+326.518843900412 x+178.116247456521 y+2.8511828891933 xy-5.74955316772684 x^2+0.232153290882707 y^2
-1.70961444824934 x^2y+0.357458461076021 xy^2+0.275975774973631 x^2y^2
Area=5348733
```

# Вывод SubPAlign для T48UUE\_2024078T040551

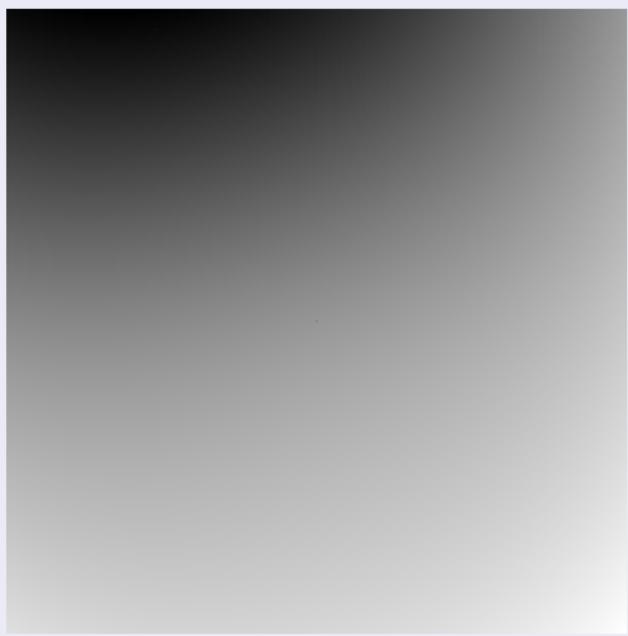
```
Processing images 10980x10980
Ata: 0.03, eps: 0.005, ScaleK: 8, ScaleB: 6
avg: -0.582325551, Sigma: 0.271877229
1: E=0.105129669, S=(0,0), G=(-0.0,0.217440659,0.0010348324) B=(B:0,K:1), BG=(B:7,13696617,K:1;-27.9623866), eta=0.03
2: E=0.10011082, S=(0.000652321978,-3.10449721E-5), G=(-0.0221166746,0.00100779489) B=(B:-0.00594747181,K:1.101310737), BG=(B:6.85801554,K:1.101310737)
3: E=0.09506077213, S=(0.000138217224,-6.34032055E-5), G=(-0.0,0.9225019777,0.000978740142) B=(B:-1.012239881,K:1.02680915), BG=(B:6.54635609,
4: E=0.0900462828, S=(0.00019899403,-9.98291368E-5), G=(-0.022897432,0.00094746657) B=(B:-0.018853266,K:1.045105263), BG=(B:6.25717269,K:1.045105263)
5: E=0.085096333, S=(0.00311328849,-0.000137661504), G=(-0.023299811,0.00091399561) B=(B:-0.025793474,K:1.05576671), BG=(B:5.93688188,K:1.05576671)
6: E=0.080270387, S=(0.00413668608,-0.000177806936), G=(-0.0237051393,0.000878214385) B=(B:-1.03305369646,K:1.07085987), BG=(B:5.60496751,K:1.07085987)
7: E=0.0756218871, S=(0.005282007,-0.000220238128), G=(-0.024108639,0.000840057476) B=(B:-0.0405593448,K:1.086221838), BG=(B:5.26311147,K:1.086221838)
8: E=0.0712033577, S=(0.00656330474,-0.00026488452), G=(-0.0245046957,0.000799474126) B=(B:-0.0483292807,K:1.10170501), BG=(B:4.91339613,K:1.10170501)
9: E=0.0670638409, S=(0.00799588633,-0.000311622987), G=(-0.0248868516,0.000756430329) B=(B:-0.0563082965,K:1.11715833), BG=(B:4.55831481,K:1.11715833)
10: E=0.063246436, S=(0.00959260163,-0.000360267254), G=(-0.02524783864,0.000710911106) B=(B:-0.0644509237,K:1.13239293), BG=(B:4.20076576,K:1.13239293)
11: E=0.0597856846, S=(0.011382914,-0.00041055599), G=(-0.025796424,0.000662922277) B=(B:-0.0727052453,K:1.14720099), BG=(B:3.84402525,K:1.14720099)
12: E=0.056705227, S=(0.0133272041,-0.00046213948), G=(-0.0258738554,0.000612491555) B=(B:-0.0810139216,K:1.16135402), BG=(B:3.49169605,K:1.16135402)
13: E=0.0540158951, S=(0.0155873208,-0.000515464777), G=(-0.0261208466,0.000559668705) B=(B:-0.0893157662,K:1.17460919), BG=(B:3.14762073,K:1.17460919)
14: E=0.0517146065, S=(0.018046673,-0.000567259181), G=(-0.0263120288,0.000504524483) B=(B:-0.097547918,K:1.18671342), BG=(B:2.81577814,K:1.18671342)
15: E=0.04978452519, S=(0.0207171608,-0.000619518414), G=(-0.0264381758,0.00044714814) B=(B:-0.10564861,K:1.19741223), BG=(B:2.50042802,K:1.19741223)
16: E=0.048194749, S=(0.02376837287,-0.0006705453171), G=(-0.0264907946,0.000387643326) B=(B:-0.11356047,K:1.20845985), BG=(B:2.20444178,K:1.20845985)
17: E=0.0469052755, S=(0.0271034874,-0.000719031642), G=(-0.026462334,0.00032612243) B=(B:-0.12124222,K:1.2136235), BG=(B:1.93210571,K:1.2136235)
18: E=0.0458675206, S=(0.0307512987,-0.000763987355), G=(-0.0264866,0.00026969225) B=(B:-0.12862531,K:1.21871287), BG=(B:1.68591575,K:1.21871287)
19: E=0.045029606, S=(0.0347463419,-0.000803821578), G=(-0.0261394137,0.00019748321) B=(B:-0.135733707,K:1.22156347), BG=(B:1.46788021,K:1.22156347)
20: E=0.04434048115, S=(0.0391062862,-0.000838761288), G=(-0.0258375772,0.000130568268) B=(B:-0.142534783,K:1.22206904), BG=(B:1.27905053,K:1.22206904)
21: E=0.0437521297, S=(0.0438486493,-0.000860717598), G=(-0.0254471776,6.20310334E-5) B=(B:-0.149053581,K:1.22071797), BG=(B:1.11940814,K:1.22071797)
22: E=0.0432253692, S=(0.0489816805,-0.000873237011), G=(-0.0249539196,-0.007334627E-6) B=(B:-0.155329262,K:1.21589779), BG=(B:0.907823953,K:1.21589779)
23: E=0.042728414, S=(0.0545216377,-0.000881444667), G=(-0.024378375,-7.97079696E-5) B=(B:-0.161421049,K:1.20929283), BG=(B:0.882115155,K:1.20929283)
24: E=0.0422386277, S=(0.060475038,-0.000851979341), G=(-0.0237213771,0.000152844334) B=(B:-0.167404932,K:1.20047654), BG=(B:0.799203138,K:1.20047654)
25: E=0.0417413582, S=(0.0668472895,-0.00081902091), G=(-0.0229905809,-0.000227446401) B=(B:-0.173368521,K:1.18959885), BG=(B:0.735366497,K:1.18959885)
26: E=0.0412283877, S=(0.0736408218,-0.000743712322), G=(-0.02194518,-0.000303444742) B=(B:-0.179404491,K:1.17638004), BG=(B:0.686563794,K:1.17638004)
27: E=0.0406961685, S=(0.080854954,-0.0006459079636), G=(-0.0213420481,-0.000380719616) B=(B:-0.185603421,K:1.1623433), BG=(B:0.648784148,K:1.1623433)
28: E=0.0401442549, S=(0.0884857103,-0.000580955128), G=(-0.0204418951,-0.000459053316) B=(B:-0.192047025,K:1.14629892), BG=(B:0.618372935,K:1.14629892)
29: E=0.03975741546, S=(0.0965254968,-0.000328409539), G=(-0.0195023421,-0.000538127061) B=(B:-0.198802746,K:1.12883292), BG=(B:0.592280216,K:1.12883292)
30: E=0.03938986291, S=(0.104967291,-9.55997319E-9), G=(-0.0185311205,-0.00061749691) B=(B:-0.205920471,K:1.1100522), BG=(B:0.568193632,K:1.1100522)
31: E=0.03893913042, S=(0.113781617,0.0001962262595), G=(-0.0175354993,-0.000696590694) B=(B:-0.213431561,K:1.09003688), BG=(B:0.544543229,K:1.09003688)
32: E=0.0377869861, S=(0.122981136,0.000592915332), G=(-0.0165224772,-0.000774732734) B=(B:-0.221349864,K:1.06884833), BG=(B:0.520402135,K:1.06884833)
33: E=0.037197756, S=(0.132475279,0.00109020893), G=(-0.0156529075,-0.000851523344) B=(B:-0.229673845,K:1.0465419), BG=(B:0.495315685,K:1.0465419)
34: E=0.0365762539, S=(0.142292576,0.00154816111), G=(-0.0144723232,-0.000925008823) B=(B:-0.238388832,K:1.02317813), BG=(B:0.469134575,K:1.02317813)
35: E=0.0359822978, S=(0.152376234,0.00219266529), G=(-0.0134497146,-0.000995421132) B=(B:-0.247468602,K:1.009883463), BG=(B:0.441874156,K:1.009883463)
36: E=0.0354044143, S=(0.1626845,0.002855586), G=(-0.0124837799,-0.00106412953) B=(B:-0.256875988,K:0.973612478), BG=(B:0.413633384,K:1.973612478)
37: E=0.03484942504, S=(0.173171296,0.003505018), G=(-0.0114470889,-0.00112233187) B=(B:-0.266562744,K:0.947641185), BG=(B:0.384554672,K:1.947641185)
38: E=0.0343233451, S=(0.18378102,0.0048913304), G=(-0.0104820544,-0.00117707122) B=(B:-0.27646909,K:0.921081014), BG=(B:0.354817878,K:1.921081014)
39: E=0.0338328418, S=(0.194480039,0.0060928248), G=(-0.00955062865,-0.00122487926) B=(B:-0.286523431,K:0.894123931), BG=(B:0.324637915,K:1.894123931)
40: E=0.0333837158, S=(0.205197089,0.00746655701), G=(-0.00865908655,-0.00126497225) B=(B:-0.296642487,K:0.866993224), BG=(B:0.294264736,K:1.866993224)
41: E=0.0329787577, S=(0.215885374,0.00902796707), G=(-0.00781279037,-0.0012966147) B=(B:-0.306732035,K:0.839941534), BG=(B:0.263981122,K:1.839941534)
42: E=0.032626681, S=(0.226493407,0.0107884816), G=(-0.00701599253,-0.0013191221) B=(B:-0.316868359,K:0.81324695), BG=(B:0.234098309,K:1.81324695)
43: E=0.0323164876, S=(0.236972181,0.0127586635), G=(-0.00627168788,-0.00133185518) B=(B:-0.326400548,K:0.787206861), BG=(B:0.204949115,K:1.787206861)
44: E=0.0320600245, S=(0.247276005,0.014946783), G=(-0.0055815297,-0.0013342126) B=(B:-0.335753691,K:0.76212938), BG=(B:0.176878336,K:1.76212938)
45: E=0.0318514216, S=(0.257362957,0.0173579815), G=(-0.00494582063,-0.00132565064) B=(B:-0.344632994,K:0.738322313), BG=(B:0.150230408,K:1.738322313)
46: E=0.0316872118, S=(0.267194864,0.0199392719), G=(-0.00436358476,-0.00130588583) B=(B:-0.352928727,K:0.716079883), BG=(B:0.125334558,K:1.716079883)
47: E=0.0315625936, S=(0.276736779,0.0228483744), G=(-0.00383272157,-0.00127362598) B=(B:-0.360541807,K:0.695667768), BG=(B:0.102488047,K:1.695667768)
48: E=0.0314718216, S=(0.285959593,0.0259124753), G=(-0.00335028573,-0.00122997905) B=(B:-0.367396077,K:0.677307339), BG=(B:0.081938554,K:1.677307339)
49: E=0.0314086772, S=(0.294820424,0.0291665847), G=(-0.00291252941,-0.00117376477) B=(B:-0.373411989,K:0.66116041), BG=(B:0.0638670835,K:1.66116041)
50: E=0.0313669681, S=(0.303297391,0.032582847), G=(-0.00251753576,-0.00110575693) B=(B:-0.378575495,K:0.647316135), BG=(B:0.0483733657,K:1.647316135)
Loading time: 0:00:00.000
Processing time: 0:00:00.031
```

# Функция ошибок в зависимости от $\delta$

Успех поиска

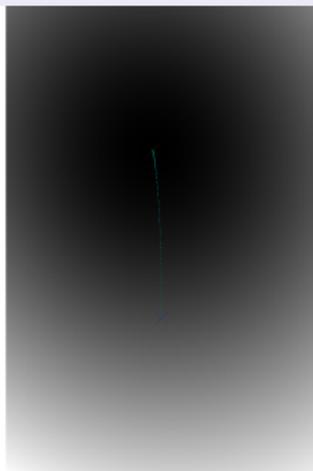


Ошибка поиска



# Функция ошибок в зависимости от $\vec{\delta}$ при сдвиге на 2 пикселя

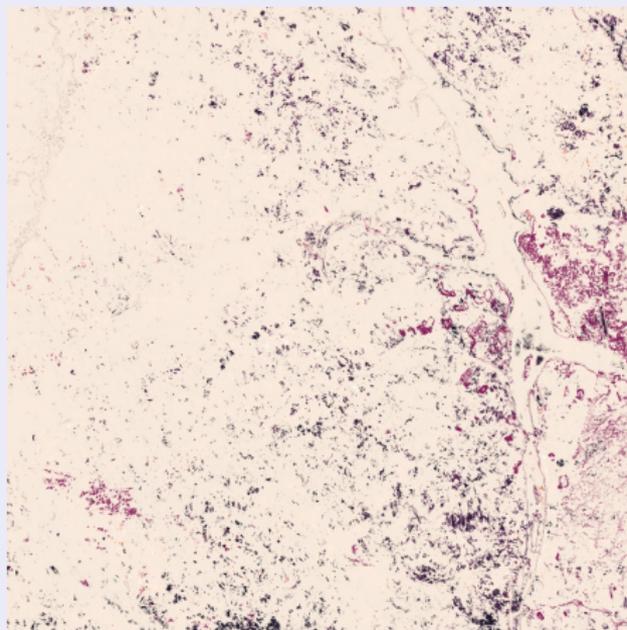
Успех поиска



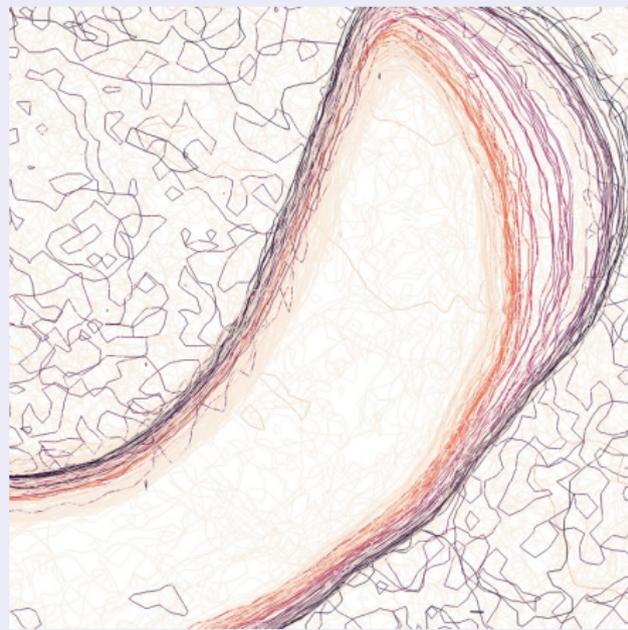
Ошибка поиска



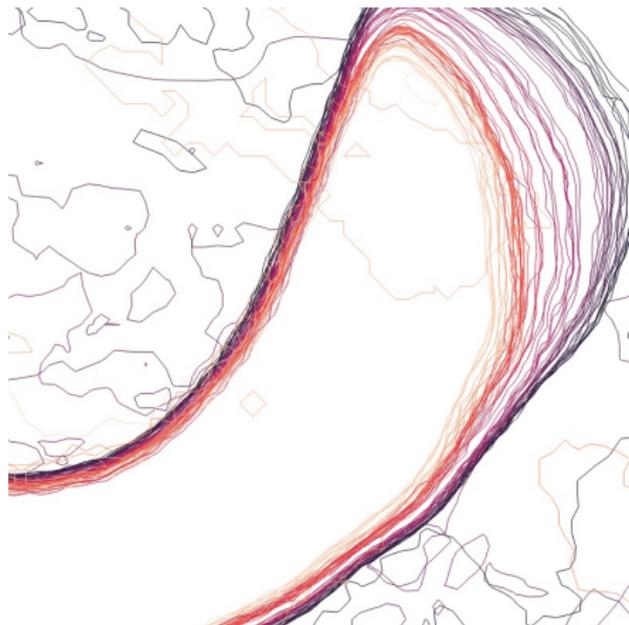
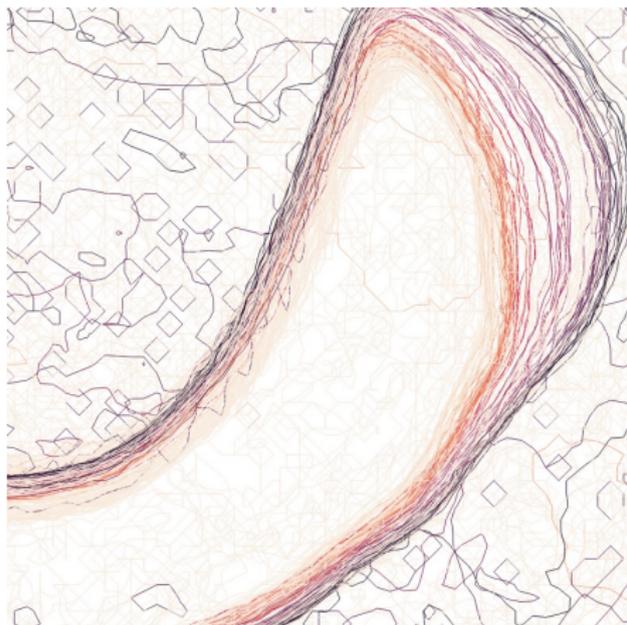
Вся трапеция



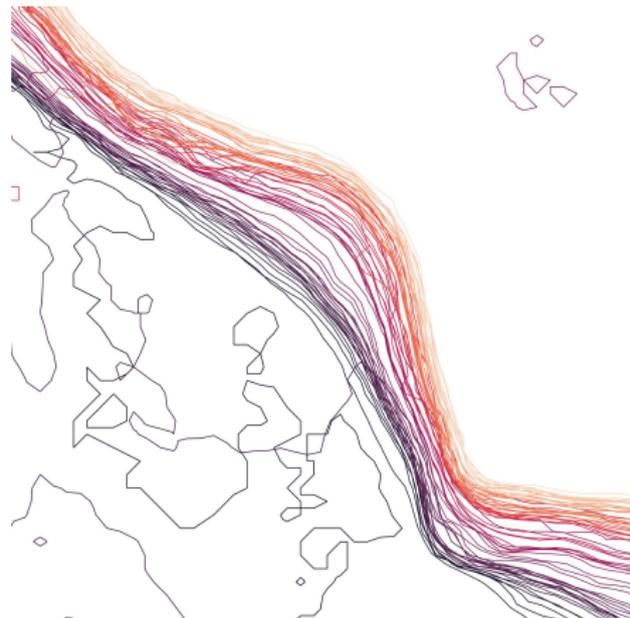
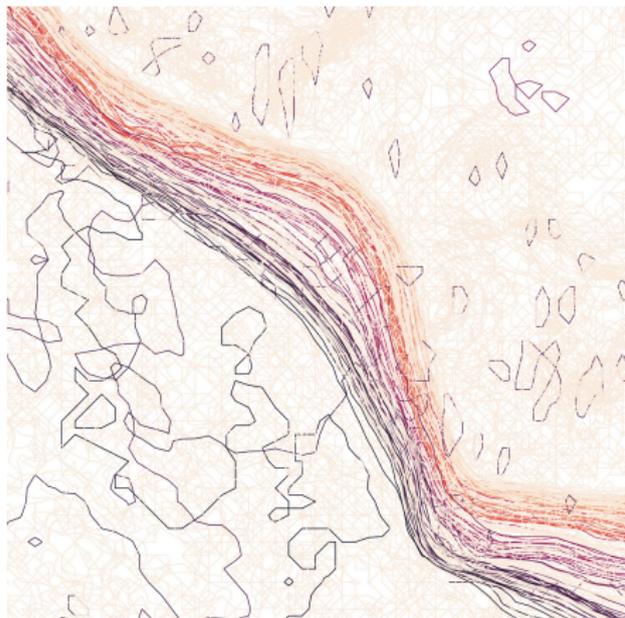
Фрагмент



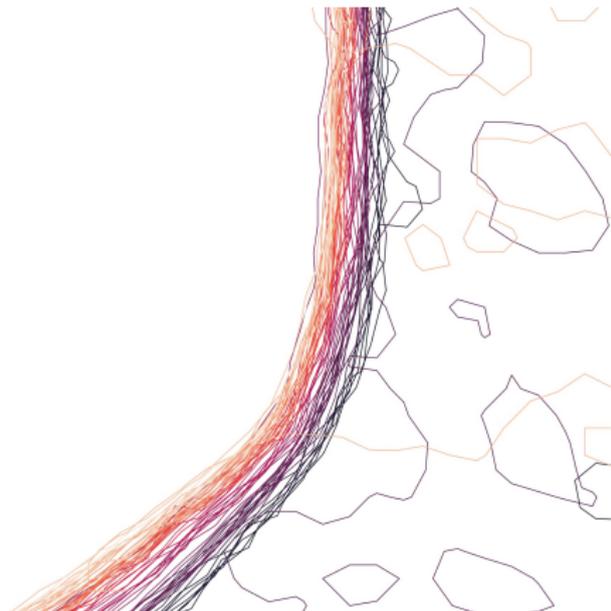
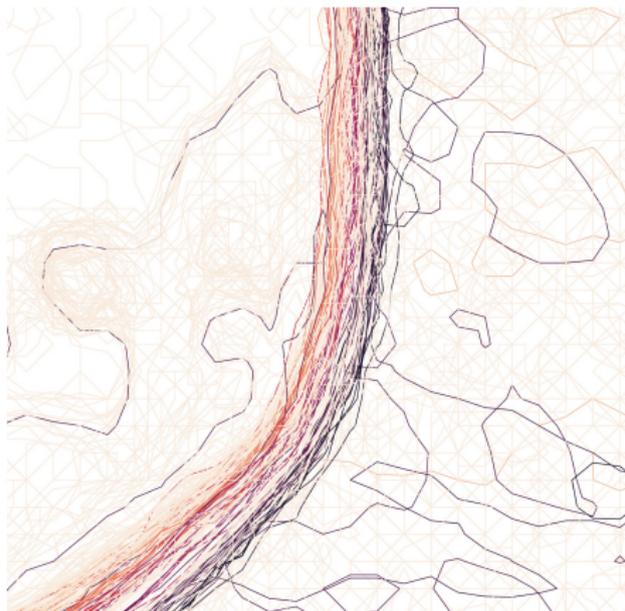
# До и после выравнивания (1/4)



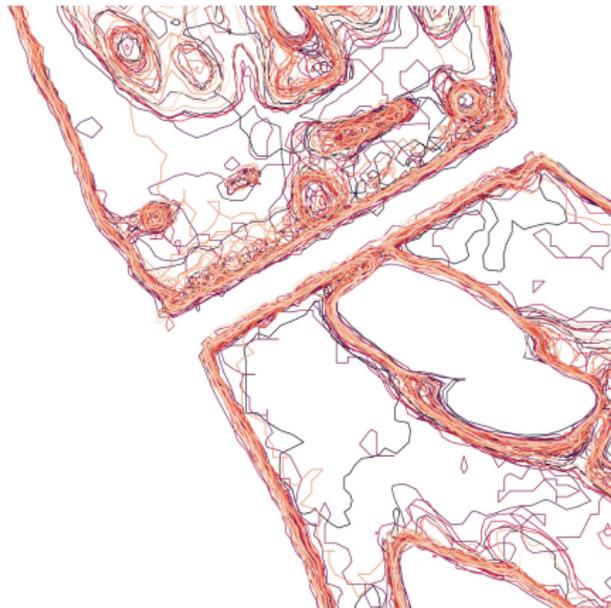
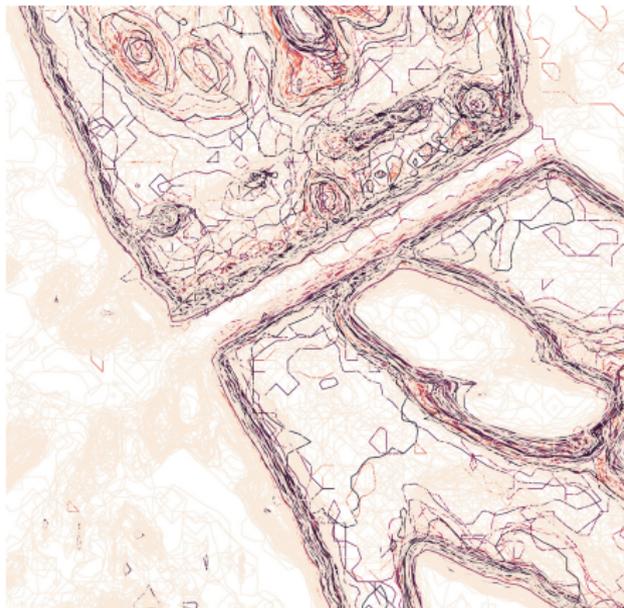
## До и после выравнивания (2/4)



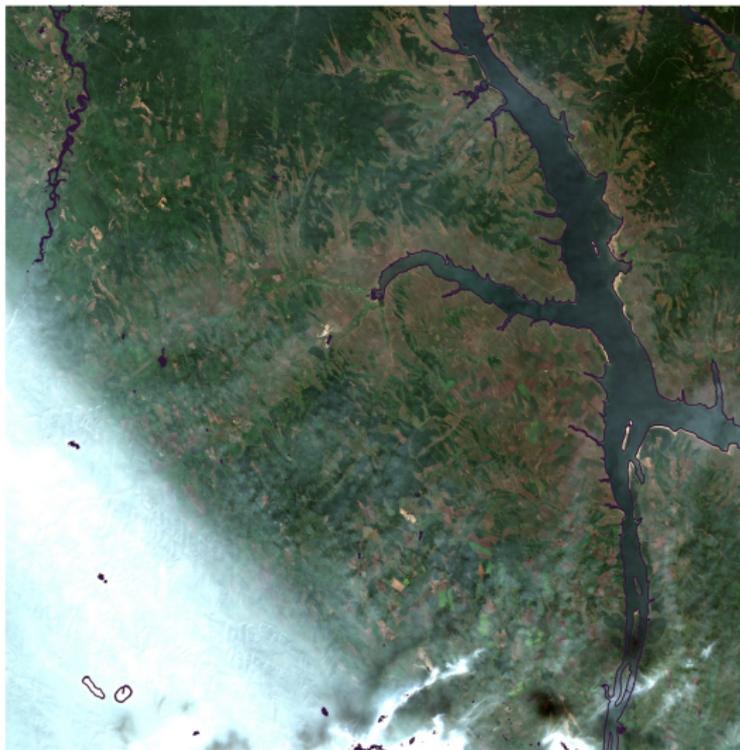
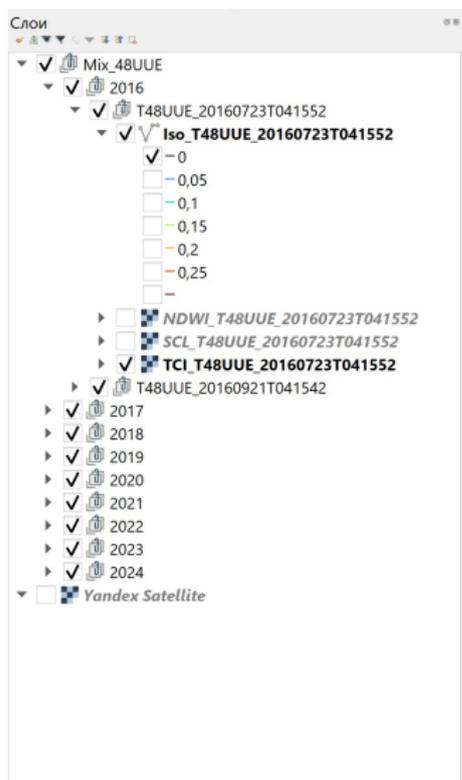
## До и после выравнивания (3/4)



## До и после выравнивания (4/4)



## Редактируем вручную (без этого нельзя, но это не слишком долго)

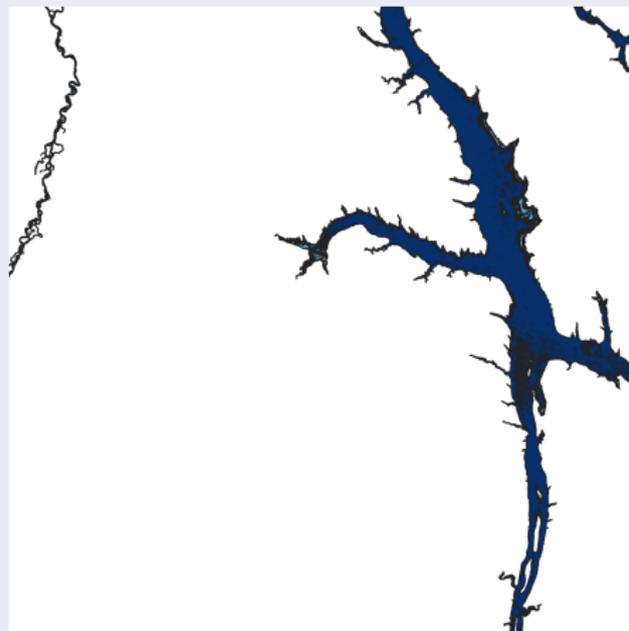


Сценарий на Python создаёт в QGIS дерево слоёв с загрузкой по необходимости. Удаляем вручную плохие слои (снег, лёд, облака) – группы слоёв целиком.

# Результат редактирования

После удаления плохих слоёв (снег, лёд, облака), объединения оставшихся слоёв, удаления “мусора”

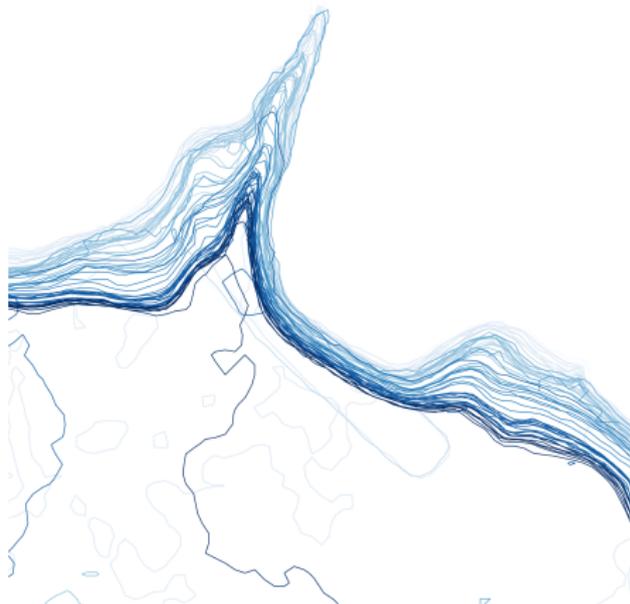
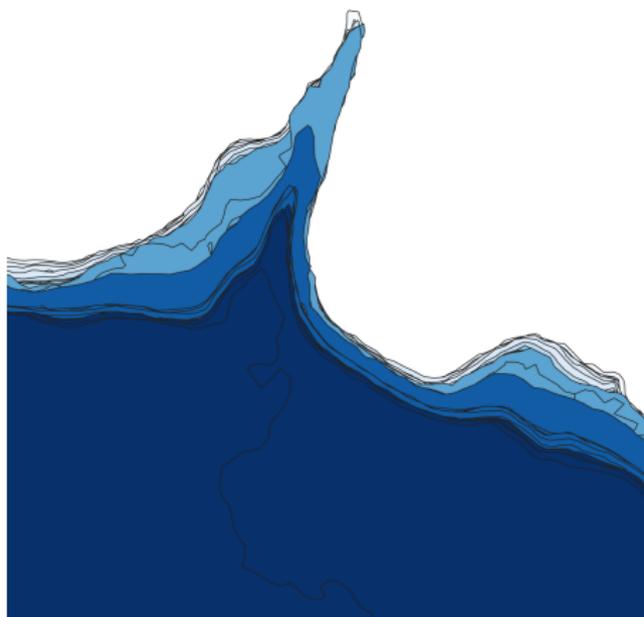
Вся трапеция



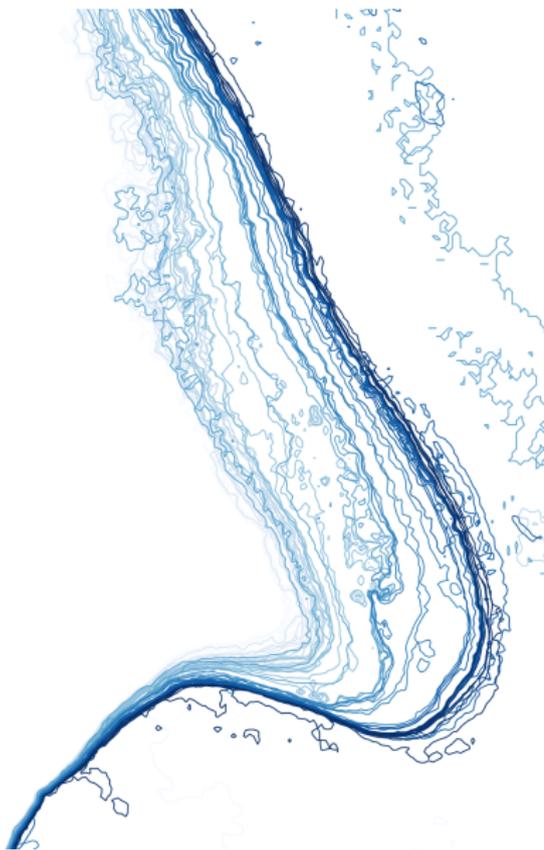
Фрагмент



# После редактирования, более мелкий фрагмент



# Ещё фрагменты после редактирования



## Согласование неточных контуров

Контур для разных уровней могут пересекаться из-за погрешности измерений и влияния таких природных явлений, как волнение, облачность, и т.д.

Поэтому возникает задача построения модели рельефа по таким контурам береговых линий, получаемых с ошибками.

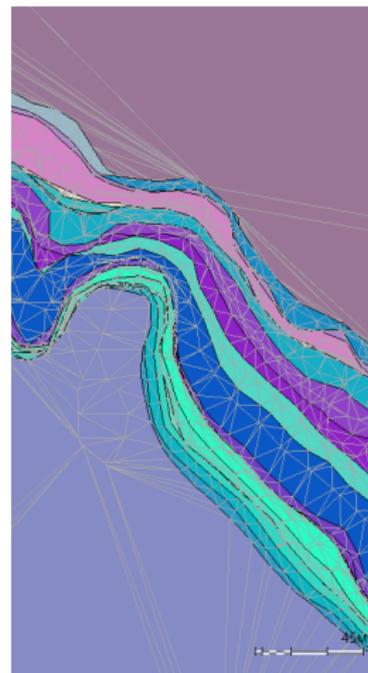
### Требования к таким алгоритмам:

- 1 при отсутствии ошибок результат должен совпадать с триангуляцией, построенной по контурам, как по изолиниям рельефа
- 2 накопление информации (добавление новых контуров) должно повышать точность получаемой модели

# Алгоритм согласования неточных контуров

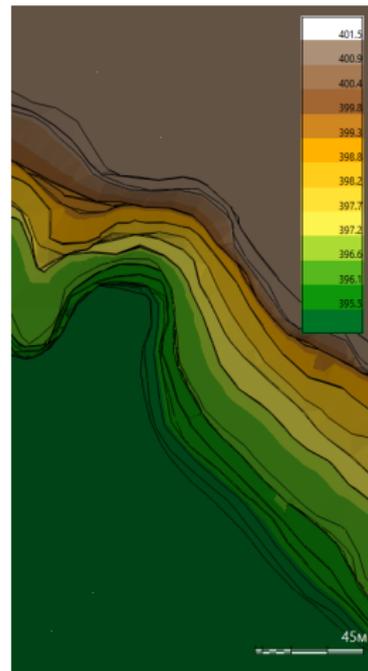
## Основные принципы:

- Контура должны быть площадными, представляющими зоны затопления при соответствующих уровнях воды.
- Строим по ним вспомогательную триангуляцию Делоне с ограничениями, в которой линии контуров выступают в качестве жёстких рёбер.
- После включения контура в триангуляцию выполняем его заливку, которая состоит в том, что в каждый треугольник внутри контура добавляется информация о том, что он затопляется этим контуром.
- В результате для каждого треугольника триангуляции формируется список уровней, которые его затопляют.
- После завершения вспомогательной триангуляции каждому треугольнику сопоставляем истинный уровень его затопления – тот, который лучше всего согласуется со списком (если и для этого уровня получается много ошибок, то считаем, что треугольник не затопляется).
- Переносим в основную триангуляцию точки жёстких рёбер, разделяющих треугольники разных уровней, и сами эти рёбра. Высота ребра =  $\min$  уровень разделяемых им треугольников – соответствует первому требованию.

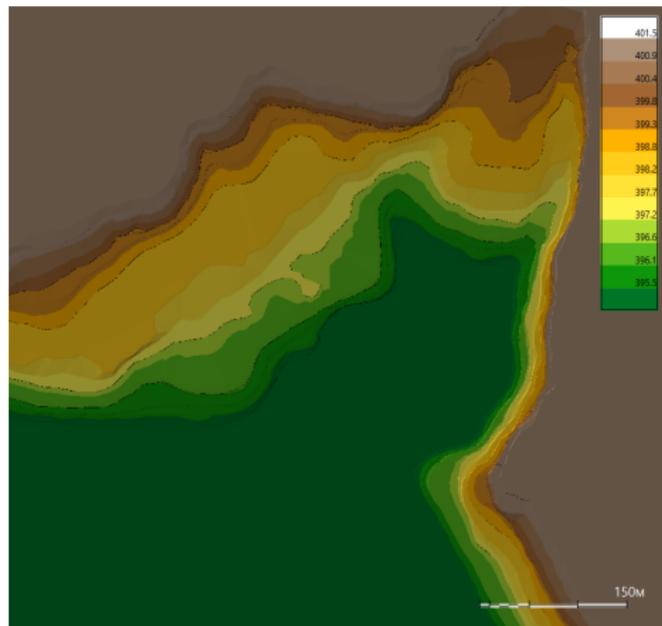
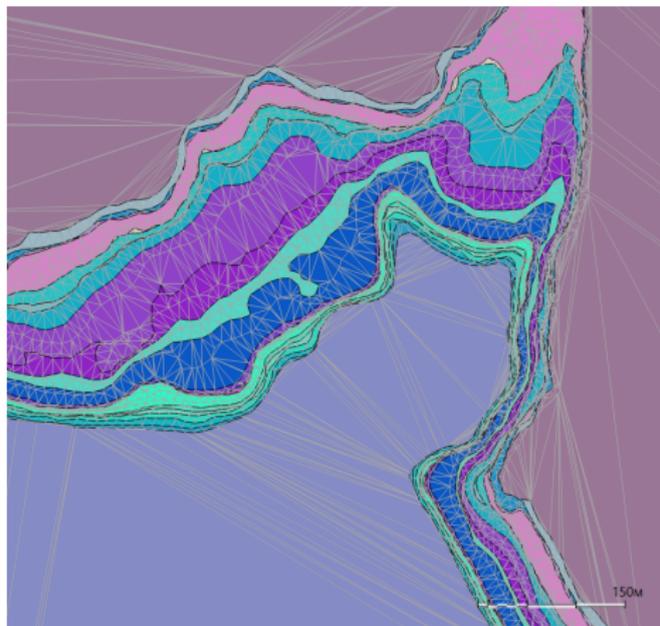


## Нет времени подробно рассмотреть:

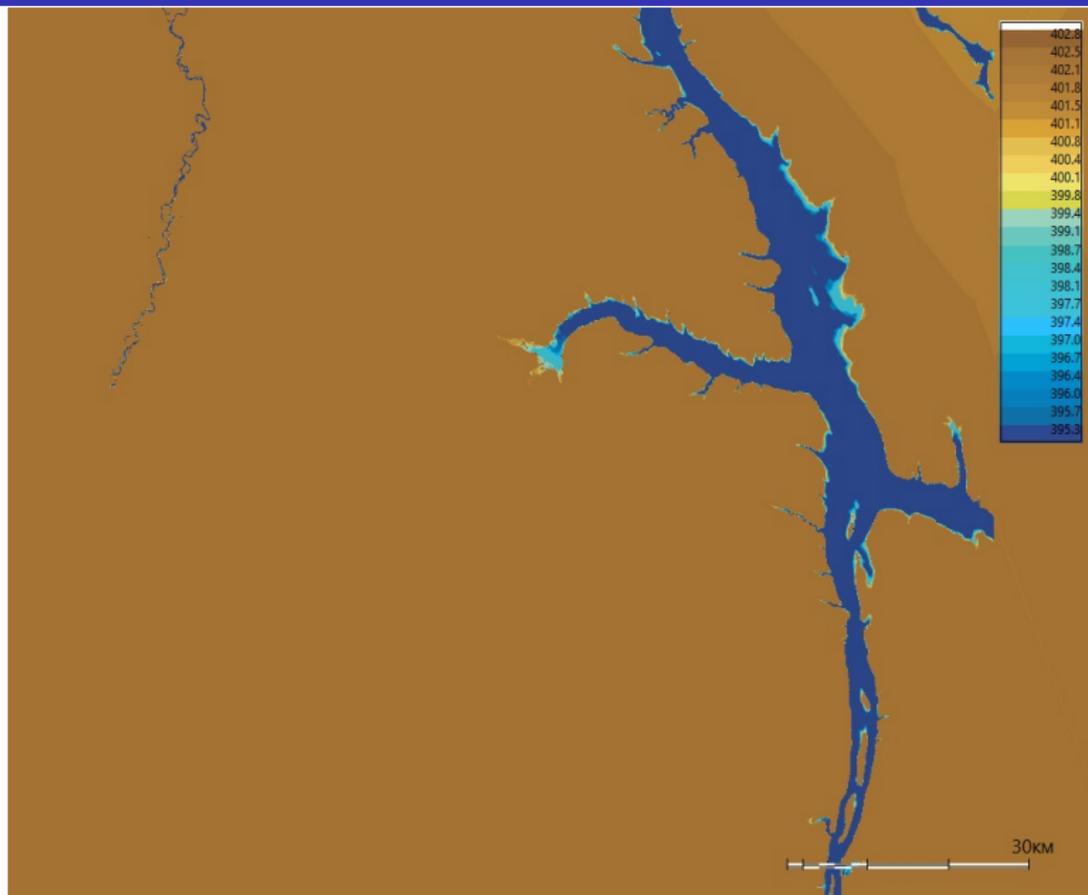
- Пока пропускались снимки с площадью покрытия менее 9900 км<sup>2</sup> – нужна модификация алгоритма согласования, учитывающая отсутствие данных.
- Вспомогательных триангуляций может быть несколько – для разных участков местности, т.к. данные некоторых снимков могут полностью отсутствовать на участке, что может ухудшить статистику, используемую при определении качества выбранного уровня, если везде использовать общий список уровней.
- Триангуляция – это 2.5D, а не 3D: нельзя задать диапазон высот в точке. Поэтому ещё добавляем вспомогательные рёбра с небольшим смещением от настоящего положения ребра, если есть разрыв в уровнях разделяемых треугольников. При этом размер триангуляции возрастает примерно в 1.5 раза.



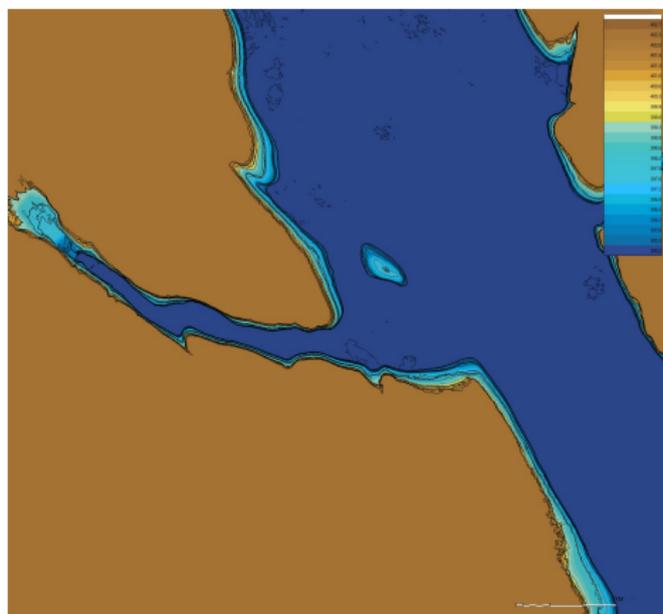
# Сопоставление вспомогательной и результирующей триангуляций



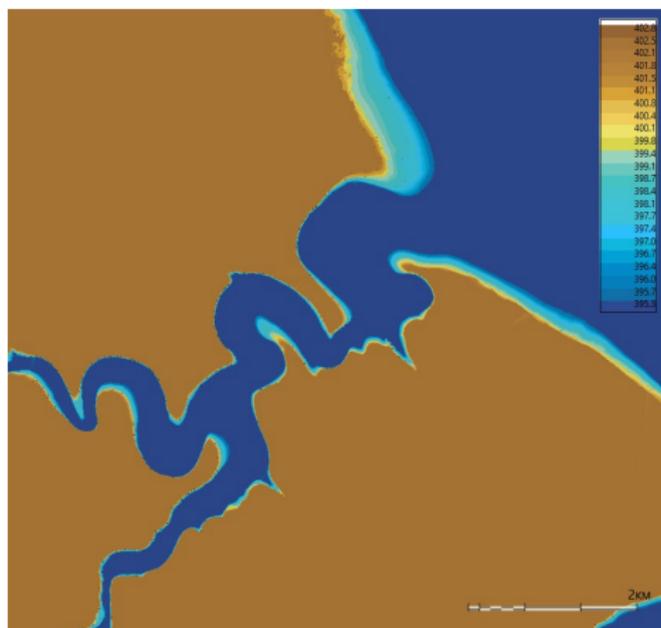
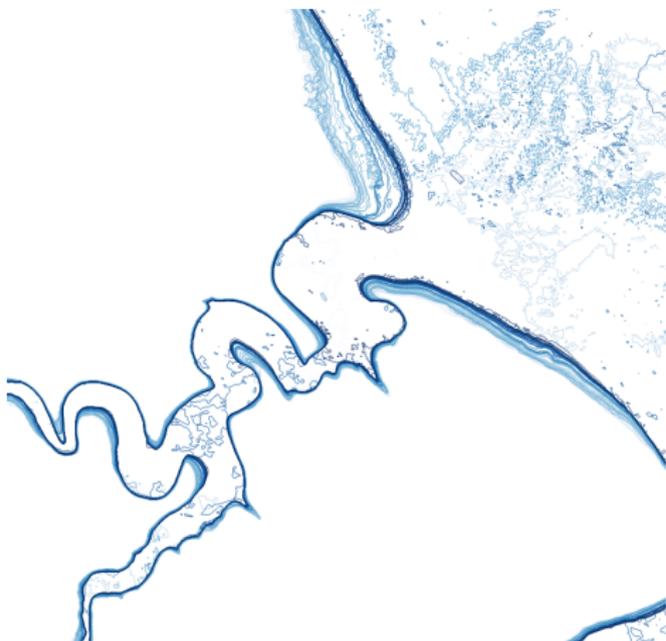
# Вся результирующая триангуляция



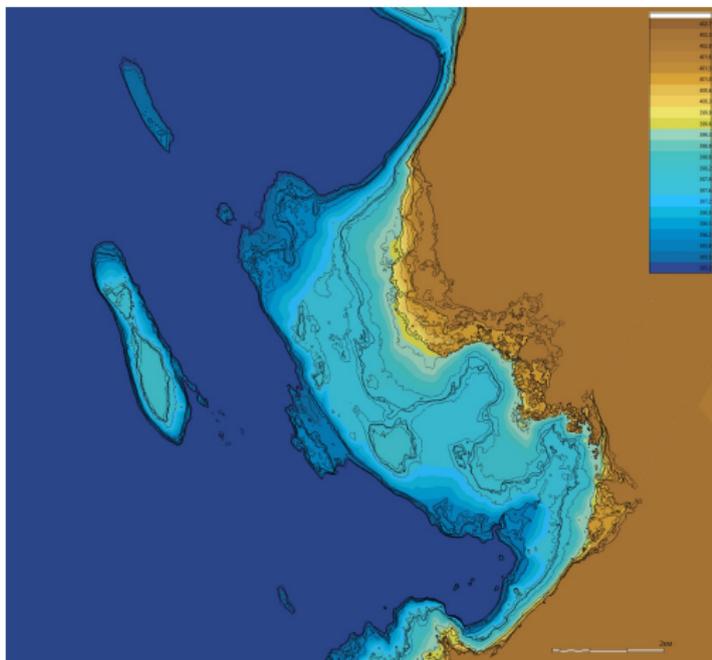
# Сопоставление контуров и результирующей триангуляции (1/2)



# Сопоставление контуров и результирующей триангуляции (2/2)



# Сопоставление снимка Яндекс и результирующей триангуляции



# Данные уровней по гидропостам Иркутского водохранилища

# дата	Исток	Никола	Бол.Речка	Патроны	Плотина	Расход ГЭС	Уров. Байкала	Байкал- Исток	Исток- Плотина	Б.Речка- Плотина
06.11.2022	456,21	456,12	455,97	455,94	455,93	1700	<b>456,75</b>	0,54	0,28	0,04
07.11.2022	456,23	456,14	455,99	455,96	455,96	1700	<b>456,75</b>	0,52	0,27	0,03
08.11.2022	456,20	456,11	455,95	455,92	455,91	1700	<b>456,75</b>	0,55	0,29	0,04
09.11.2022	456,23	456,13	455,97	455,93	455,92	1700	<b>456,75</b>	0,52	0,31	0,05
10.11.2022	456,20	456,12	455,95	455,93	455,91	1700	<b>456,75</b>	0,55	0,29	0,04
11.11.2022	456,19	456,12	455,94	455,92	455,91	1715	<b>456,74</b>	0,55	0,28	0,03
12.11.2022	456,19	456,12	455,95	455,92	455,91	1715	<b>456,74</b>	0,55	0,28	0,04
13.11.2022	456,19	456,11	455,95	455,93	455,92	1703	<b>456,74</b>	0,55	0,27	0,03
14.11.2022	456,19	456,10	455,95	455,92	455,92	1704	<b>456,73</b>	0,54	0,27	0,03
15.11.2022	456,19	456,09	455,94	455,91	455,91	1703	<b>456,73</b>	0,54	0,28	0,03
16.11.2022	456,20	456,10	455,95	455,92	455,92	1702	<b>456,72</b>	0,52	0,28	0,03
17.11.2022	456,20	456,09	455,94	455,90	455,90	1700	<b>456,71</b>	0,51	0,3	0,04
18.11.2022	456,15	456,05	455,85	455,83	455,81	1700	<b>456,71</b>	0,56	0,34	0,04
19.11.2022	456,15	456,05	455,88	455,85	455,84	1700	<b>456,71</b>	0,56	0,31	0,04
20.11.2022	456,16	456,06	455,91	455,88	455,88	1704	<b>456,70</b>	0,54	0,28	0,03
21.11.2022	456,15	456,07	455,93	455,90	455,89	1700	<b>456,69</b>	0,54	0,26	0,04
22.11.2022	456,16	456,07	455,89	455,86	455,85	1700	<b>456,68</b>	0,52	0,31	0,04
23.11.2022	456,17	456,08	455,91	455,88	455,87	1710	<b>456,67</b>	0,5	0,3	0,04
24.11.2022	456,13	456,04	455,85	455,83	455,81	1705	<b>456,67</b>	0,54	0,32	0,04
25.11.2022	456,12	456,01	455,84	455,81	455,81	1705	<b>456,66</b>	0,54	0,31	0,03
26.11.2022	456,14	456,04	455,86	455,84	455,83	1703	<b>456,66</b>	0,52	0,31	0,03
27.11.2022	456,10	455,99	455,68	455,67	455,64	1703	<b>456,65</b>	0,55	0,46	0,04
28.11.2022	456,06	455,93	455,69	455,66	455,66	1730	<b>456,65</b>	0,59	0,4	0,03
29.11.2022	456,05	455,93	455,73	455,69	455,69	1725	<b>456,64</b>	0,59	0,36	0,04
30.11.2022	456,06	455,95	455,72	455,70	455,68	1720	<b>456,63</b>	0,57	0,38	0,04
Среднее	455,897	455,762	455,526	455,509	455,507	1741,152	456,446	0,549	0,389	0,019
Дисперсия	0,340	0,364	0,412	0,421	0,420	519,419	0,346	0,039	0,233	0,027



Спасибо за внимание!

# Использование контуров береговых линий со спутниковых изображений Sentinel-2 для построения моделей прибрежного рельефа

Алексей Евгеньевич Хмельнов, Т.Ф. Хмельнова

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова  
Сибирского отделения  
Российской академии наук  
(ИДСТУ СО РАН)  
<http://idstu.irk.ru>

27 августа 2025

SDM-2025, Белокуриха