# Разработка цифровых моделей рельефа для мелководных зон и прибрежных территорий оз. Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС

#### Алексей Евгеньевич Хмельнов, А.С. Гаченко

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск http://idstu.irk.ru

26 августа 2022г.

# Постановка задачи

#### Обзорная карта исследуемых участков

Для выполнения этих работ необходимо иметь качественные цифровые модели рельефа мелководных зон и прибрежных территорий, подверженных потенциальным ущербам при регулировании уровня озера Байкал, с выделением отдельных участков (для озера Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС).



Источники информации о наземном рельефе

# Построение совмещённой модели надводного и подводного рельефа на Братском водохранилище

#### Использование:

- Определение уровня подземных вод (влияет на колодцы);
- Определение уровня воды в районе водозаборов.

### Источники информации о рельефе:

#### Были выбраны:

- изолинии и отметки высот векторных топографических карт;
- оцифровка отметок глубин и изобат с бумажных лоций;
- промеры глубин эхолотом в ходе экспедиции.

#### также рассматривались ЦМР:

- глобальные модели рельефа SRTM 1", ASTER 1", ALOS";
- коммерческая WorldDEM. Тогда было 12м/пиксел и не было на нашу территорию. Сейчас 5м/пиксел и недоступна.

Используемые источники информации требуется реалистично согласовать.

# SRTM $1'' \approx 30 M$

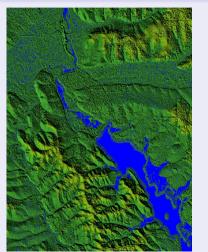




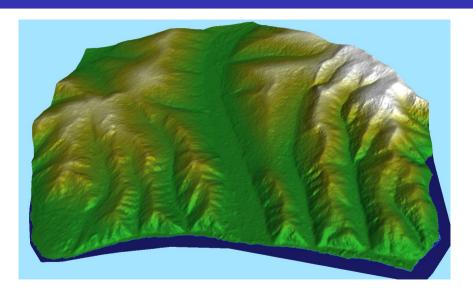
# ALOS $1'' \approx 30 M$







#### WorldDEM 12м - Листвянка

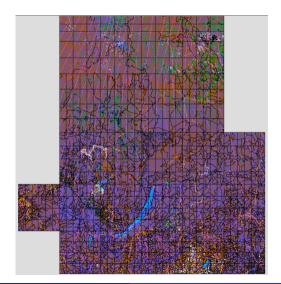


#### Топографические карты масштабов 1:50000,1:100000,1:1000000

#### Сервис получения карт

На сайте крупного проекта: http://baikal-project.icc.ru (Цифровые ресурсы/Сервис получения карт).

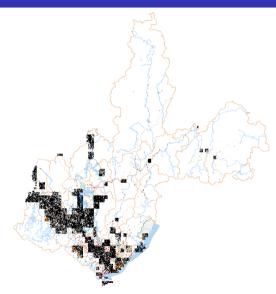




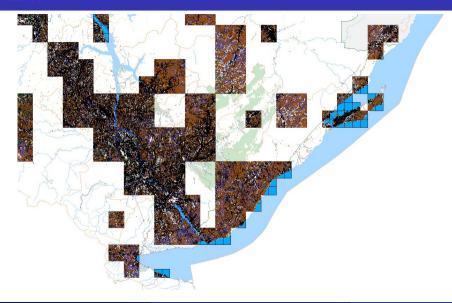
#### Листвянка 1:50000



# Топографические карты масштаба 1:25000



#### Байкал 1:25000



#### Листвянка 1:25000



Сечение рельефа у любых открытых карт — 20м! Иначе это - карты ДСП, получаемые по 25км $^2$ .

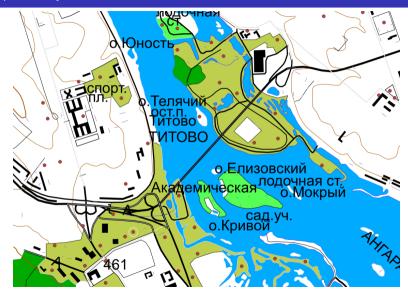
# Сопоставление топографических карт 1:50000 со спутниковым снимком



# Карты могут быть не везде актуальны



# В новой версии лучше



# SRTM - тоже не везде актуальна



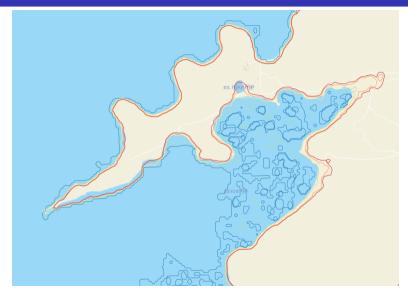
# То же место на SRTM в 2002 г.



# Изолинии по SRTM 1" - Ольхонские ворота



# Изолинии по SRTM 1" - Увеличенный фрагмент

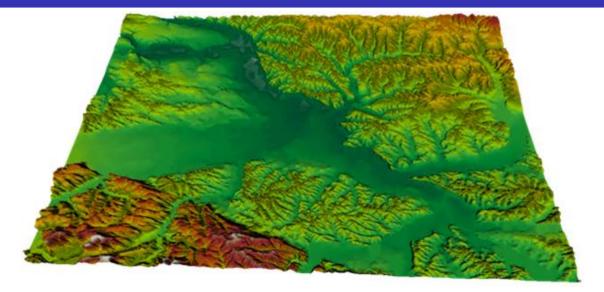


# Изолинии по SRTM 1" - Сарма

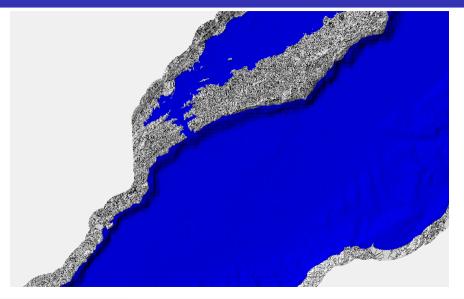


Триангуляции, как цифровые модели рельефа

# ЦМР, полученная из топоосновы 1:50000



## Совмещённая ЦМР, из топоосновы 1:50000 и подводного рельефа 180м



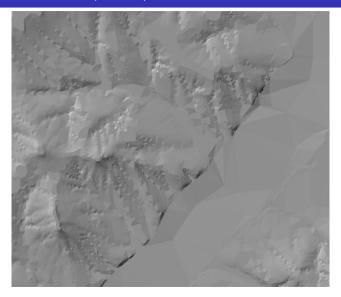
#### Совмещённая ЦМР, из топоосновы 1:50000 и подводного рельефа 180м - фрагмент



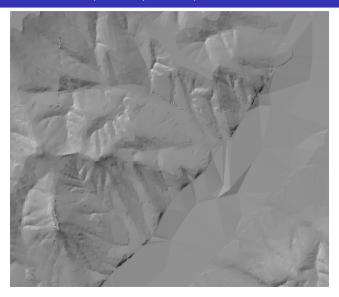
# Исправление артефактов триангуляции, построенной по изолиниям

- Триангуляции, построенные по изолиниям содержат хорошо заметные артефакты горизонтальные ступени (террасы), построенные на точках изолинии одного уровня;
- Это сильно портит результат при сгущении изолиний (появляются срезанные изгибы у добавленных изолиний);
- Разработан алгоритм устранения таких артефактов за счёт добавления жёстких рёбер;
- Комбинированная триангуляция содержит 4099106 точек;
- После исправления в ней содержится 6610182 точек.

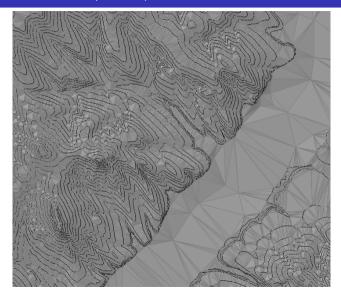
# Комбинированная модель рельефа



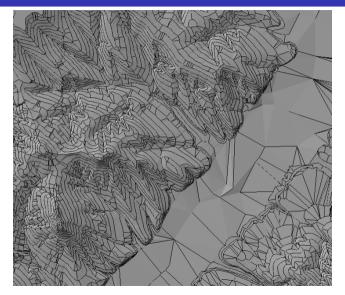
# Комбинированная модель рельефа исправленная



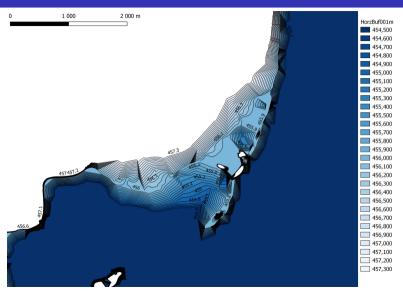
# Комбинированная модель рельефа



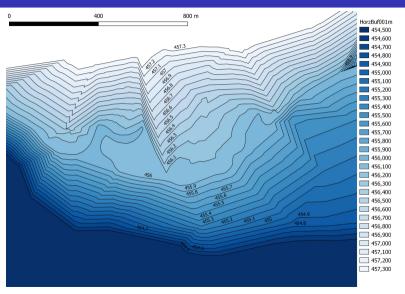
# Комбинированная модель рельефа исправленная



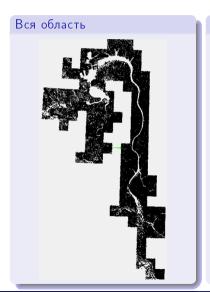
#### Площадные изолинии, как горизонтальные сечения рельефа



#### Площадные изолинии, как горизонтальные сечения рельефа



# Триангуляция - модель рельефа Братского водохранилища





Подводный рельеф

# Модель прибрежного рельефа

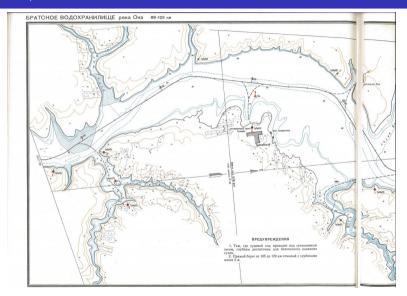
#### Использование:

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

# 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.

#### Лист лоцманской карты



## Обработка промеров глубин эхолотом

- Для промеров использовался портативный эхолот с ГНС бытового уровня на борту;
- Точность измерения координат эхолотом несколько метров;
- Большая проблема с получаемыми от него данными округление координат до метров  $\rightarrow$  даёт ступенчатую траекторию;
- Дополнительно использовался профессиональный ГНС геодезического уровня;
- Измерения двух ГНС сопоставлялись с использованием меток времени.

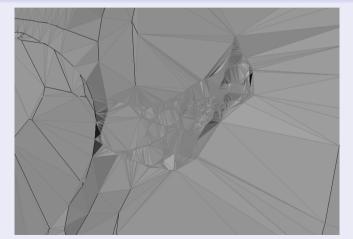
### Сопоставление траекторий, измеренных эхолотом и геодезическим ГНС



## Уточнение модели рельефа по промерам глубин

- Создаём вспомогательную триангуляцию по измерениям эхолота;
- Удаляем изменяемый фрагмент из исходной триангуляции;
- Заменяем этот фрагмент на вспомогательную триангуляцию.

Совмещённая модель рельефа с фрагментом, полученным по промерам глубин



## Данные ДЗЗ для исследования прибрежного рельефа

Позволяют получить наиболее широкий охват территории.

Съёмка с таких спутников, как Sentinel и LandSat выполняется регулярно, и такие данные распространяются свободно при разрешении 10 м/пиксел для основных каналов.

Методы использования данных ДЗЗ для получения информации о подводном рельефе до некоторой глубины:

- использование стереоскопических спутниковых изображений высокой точности;
- обработка спутниковых радарных изображений различных типов;
- инверсия батиметрии из данных о цвете воды;
- восстановление батиметрии по характеристикам волнения.

## Контура береговых линии

Могут рассматриваться, как изолинии прибрежного рельефа.

#### при следующих условиях:

- уровень воды постоянен вдоль береговой линии в каждый момент озеро, водохранилище. Для правильной интерполяции уровня вдоль берега реки требуется модель её течения;
- волнением можно пренебречь;
- приливы и сейши малы (для Байкала 32 мм и 60 мм);
- отсутствие льда и снега;
- имеются колебания уровня воды с течением времени несколько изолиний для разных уровней.

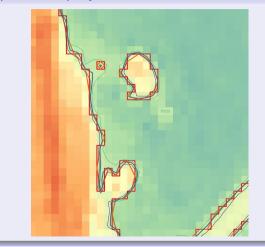
## Наш подход: выделение изолиний без бинаризации

## Шаги обработки снимка

- Вычислить растр NDWI (Normalized Difference Water Index) (для Sentinel-2 используем каналы B03 Green и B08 Visible and Near Infrared: NDWI = B03-B08/B03+B08);
- Построить изолинии растра NDWI с шагом 0.05 от 0.0 до 0.25;
- Выбрать наилучший порог (обычно 0.1).

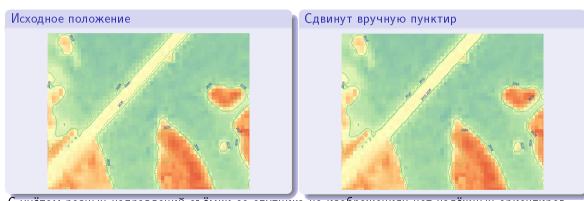
В результате получаем субпиксельный уровень точности, превышающий 10 м.

#### Сравнение результатов



## 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.



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

## Алгоритм поиска наилучшего сдвига

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



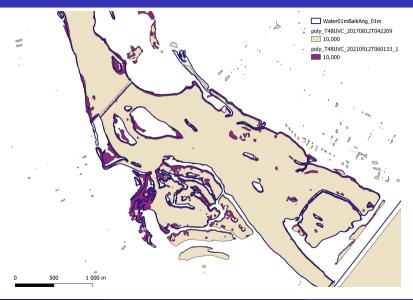
на фоне NDWI для 20180827

#### Результат сдвига



на фоне NDWI для 20180825

## Водные объекты в Иркутске 12.08.2017 (1300 $\text{m}^3/c$ ) и 12.09.2021 (3600 $\text{m}^3/c$ ) по данным Sentinel



Уточнение наземной модели рельефа с использованием аэрофотосъёмки (AФC)

#### Найденные

#### Архивные данные КадастрСъёмки

- использовались самолёт, камера высокого разрешения 80 Мп, лидар (ВЛС воздушное лазерное сканирование)
- в архиве есть бо́льшая часть интересующих нас участков
- Это ЦМР, а не ЦММ

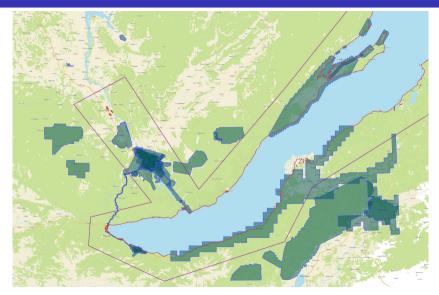
Всего покупаем  $32 \text{ км}^2$ .

#### Съёмка с БПЛА

- Квадрокоптер долго
- БПЛА самолётного типа ГеоСкан 101 технологично
- геодезическая привязка обязательна

Всего надо снять  $\sim 10 \text{ км}^2$ .

#### Карта покрытия лидарной съёмкой



#### Байкальск – Лидарные точки



#### Байкальск – 3D модель по точкам



#### Планы полёта квадрокоптера в Pix4Dcapture



#### Затраты времени при съёмке

#### С квадрокоптера

- Значительная часть участков находится в круге радиусом 80 км вокруг Иркутского аэропорта, в котором квадрокоптер не поднимается выше 100 м;
- 🔸 Одной батареи хватает на съёмку поперечными галсами менее 10 га с такой высоты;
- У нас 4 батареи можем снять не более 0,4 км²;
- Далее надо снова зарядить батареи, зарядка одной занимает 1,5 часа;
- Если первые полёты выполнить утром, и сразу начать зарядку, то может получиться сделать ещё одну съёмку вечером.

#### С БПЛА самолётного типа

- Батареи хватает на 1 час;
- ullet Одной батареи хватает на съёмку поперечными галсами  $\sim\!1$  км $^2$  с высоты 150 м;
- Можно летать на высоте 220 м в зоне аэоропорта площадь ещё увеличится.

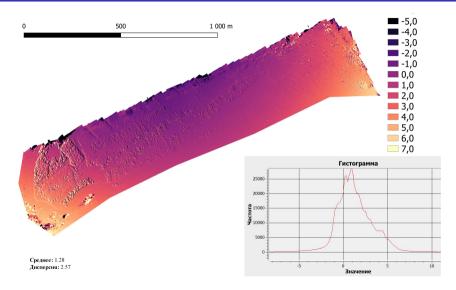
#### но

- более продолжительное время подготовки к полету ( $\sim$ полчаса);
- 💿 бо́льшая часть времени уходит на развороты между галсами при поперечном облёте узких участков;
- возможна болтанка при ветре смазы на фото.

#### Ортофотоплан фрагмента местности в районе Иркутского водохранилища, съемка БПЛА с высоты 220 м



#### Разность ЦМР для полётов на высотах 150м и 220м и её гистограмма



# Ортофотопланы больших участков, снятые с ГеоСкан 101





#### Заключение

- Основным используемым нами представлением моделей рельефа являются триангуляции;
- Триангуляции позволяют строить профили вдоль любых траекторий и дополнительные изолинии;
- Могут строиться изолинии, как площадные поперечные сечения;
- Получен набор совмещенных 3D модели рельефа для ряда водных объектов и их участков (Иркутское водохранилище, Братское водохранилище, поселок Листвянка, фрагменты озера Байкал);
- Получена комплексная модель совмещенного рельефа на протяжении от ГЭС в городе Иркутске до впадения реки Белая в Ангару (протяженность порядка 132 км);
- Разработана оригинальная технология сопряжения надводного рельефа с подводным;
- Изолинии растра NDWI позволяют выделить границы береговой линии с субпиксельной точностью;
- Далее может потребоваться коррекция горизонтального сдвига в пределах размеров пикселя;
- Для бо́льшей части уточняемых участков есть архивная лидарная съёмка в процессе приобретения (организация тендера);
- Показана необходимость использования БПЛА самолётного типа для съёмки участков местности большой площади;
- Выполнена съёмка с использованием БПЛА различных типов ряда исследуемых территорий и выбраны методы съёмки и последующей обработки, позволяющие достичь желаемой точности получаемых моделей местности;
- Показана необходимость использования геодезической привязки снимков.

# Разработка цифровых моделей рельефа для мелководных зон и прибрежных территорий оз. Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС

#### Алексей Евгеньевич Хмельнов, А.С. Гаченко

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск http://idstu.irk.ru

26 августа 2022г.