

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИДЕОТРАНСЛЯЦИЙ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ И СЕЙШЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ОЗЕРАХ

Фищенко В.К., Зимин П.С.. Гончарова А.А.,
ТОИ ДВО РАН

fischenko@poi.dvo.ru

23-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
10 - 14 ноября 2025 г. , ИКИ РАН, Москва

Введение

Цель доклада: представить возможности разработанной авторами простой программной технологии QAVIS (Quick Analysis of Video and Images for Scientists) для дистанционного измерения сигналов волнения и колебаний уровня воды в озерах.

Кому может быть полезна такая технология ? Предполагаем, что:

1. лимнологам и вообще специалистам в области гидрологии суши
2. разработчикам спутниковых методов измерения этих характеристик для их поверки на синхронных подспутниковых данных

В чем основная идея технологии QAVIS ?

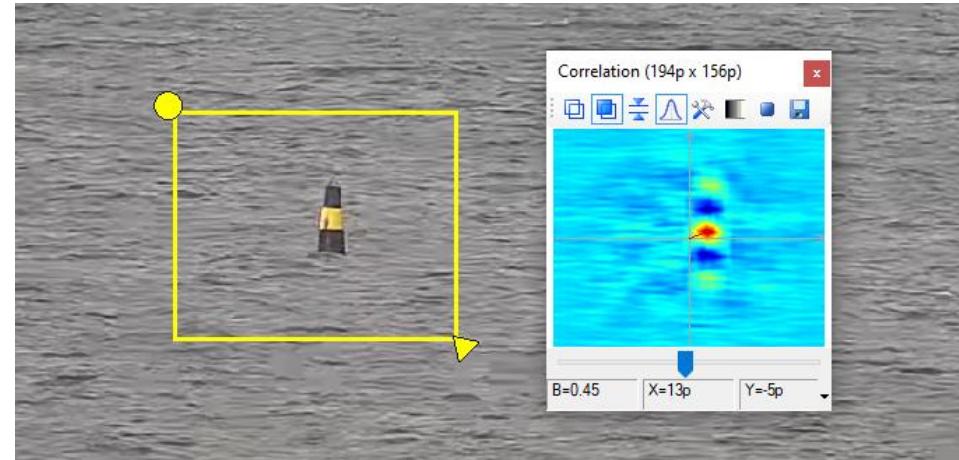
Регистрировать вертикальные движения маркерных объектов на поверхности воды на основе анализа прибрежных видеотрансляций с IP камер, установленных самостоятельно либо найденных в Интернете.. Рассматривать эти движения как оценку сигнала колебаний уровня воды $H(t)$

Как происходит работа пользователя QAVIS ?

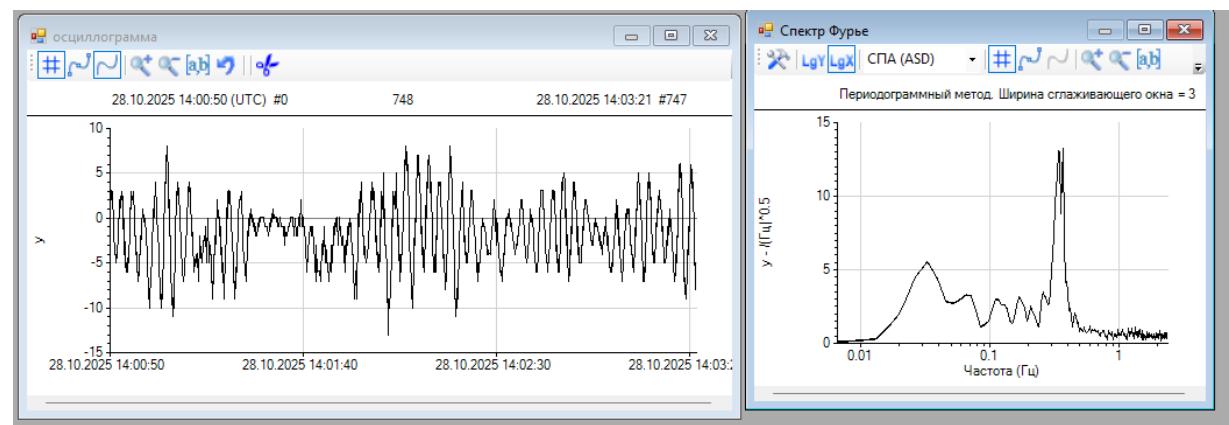
Специалист просматривает трансляцию и находит потенциально полезные маркеры. (буи, бакены, морские суда). Вызывает инструмент Корреляция, выделяет область возможных движений маркера. Запоминает начальный кадр (эталон), запускает процесс отслеживания (трекинга) движений маркера.

На каждом такте рассчитывается и отображается взаимная корреляционная функция между текущим и начальным (эталонным) кадрами. В выходной файл записываются координаты ее максимума (X,Y), координата Y – есть очередной отсчет сигнала волнения $h(t)$, измеренный в пикселях. Для перевода значений сигнала в сантиметры нужно оценить высоту одного пикселя d в плоскости расположения маркера. Можно, например, поделить реальную высоту маркера на его высоту в пикселях. Тогда сигнал волнения $H(t)=h(t) * d$.

Трансляция с крыши ТОИ.
Амурский залив,
навигационный бакен.
Расстояние 1.2 км.
Размер пикселя 5 см.



Длительность 2.5 мин.
Осциллограмма и
спектр Фурье.
Основная
периодичность 2.9 с,
высота значит. волн
 $SWH = 62\text{см}$



Если размах колебаний маркера очень мал (2-3 пикселя и меньше) то можно включить в QAVIS опцию субпиксельного трекинга.

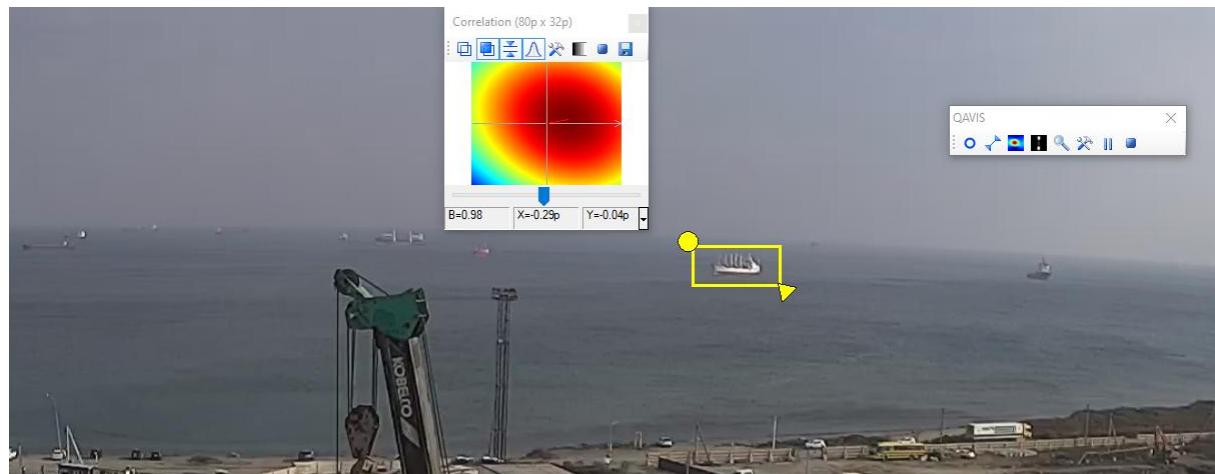
Пример: маркер - судно на рейде в заливе Патрокла.

Расстояние 1.4 км

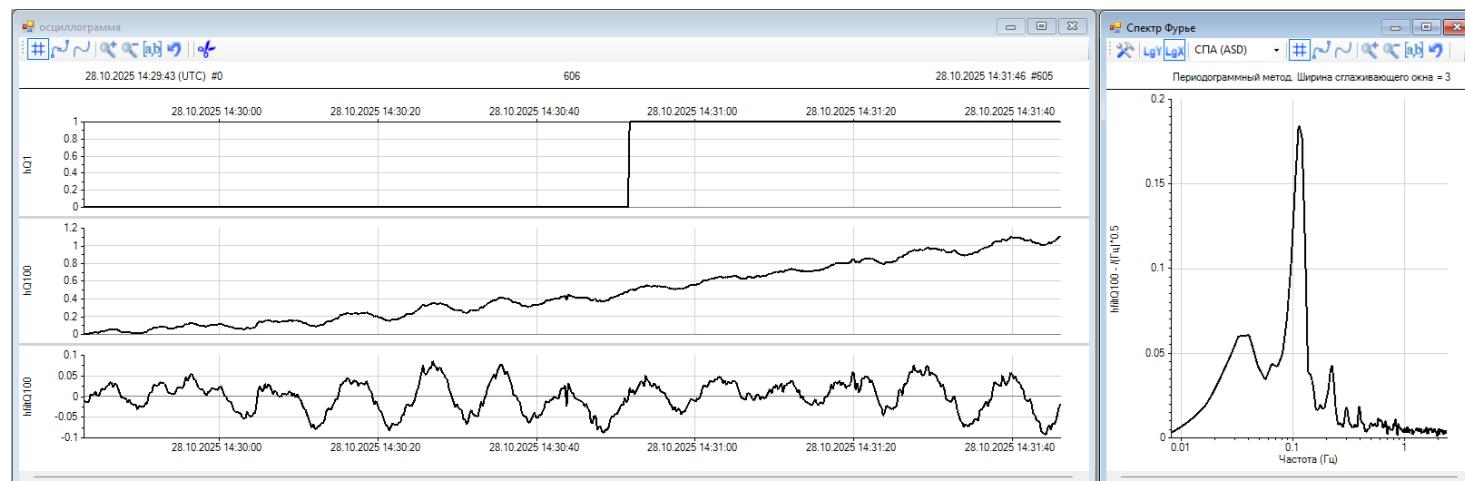
Размер пикселя 3.3 м

Q = 100

Длительность измерений 2 мин.



Показаны слева сверху вниз: результаты стандартного трекинга, субпиксельного (Q=100), сигнал после удаления квадратичного тренда; справа: спектр Фурье



Высота значительных волн 0.122 пикс (0.4 метра), пик в спектре 9 сек (зыбы)!

О точности процедуры субпиксельного трекинга в QAVIS

Все же остается вопрос. Насколько точно можно с помощью QAVIS измерять колебания уровня моря на основе методики субпиксельного корреляционного трекинга движений маркерных объектов на поверхности воды ?

Лучший способ выяснить – провести QAVIS измерения и сравнить их с данными независимых синхронных измерений колебаний уровня моря профессиональными приборами.

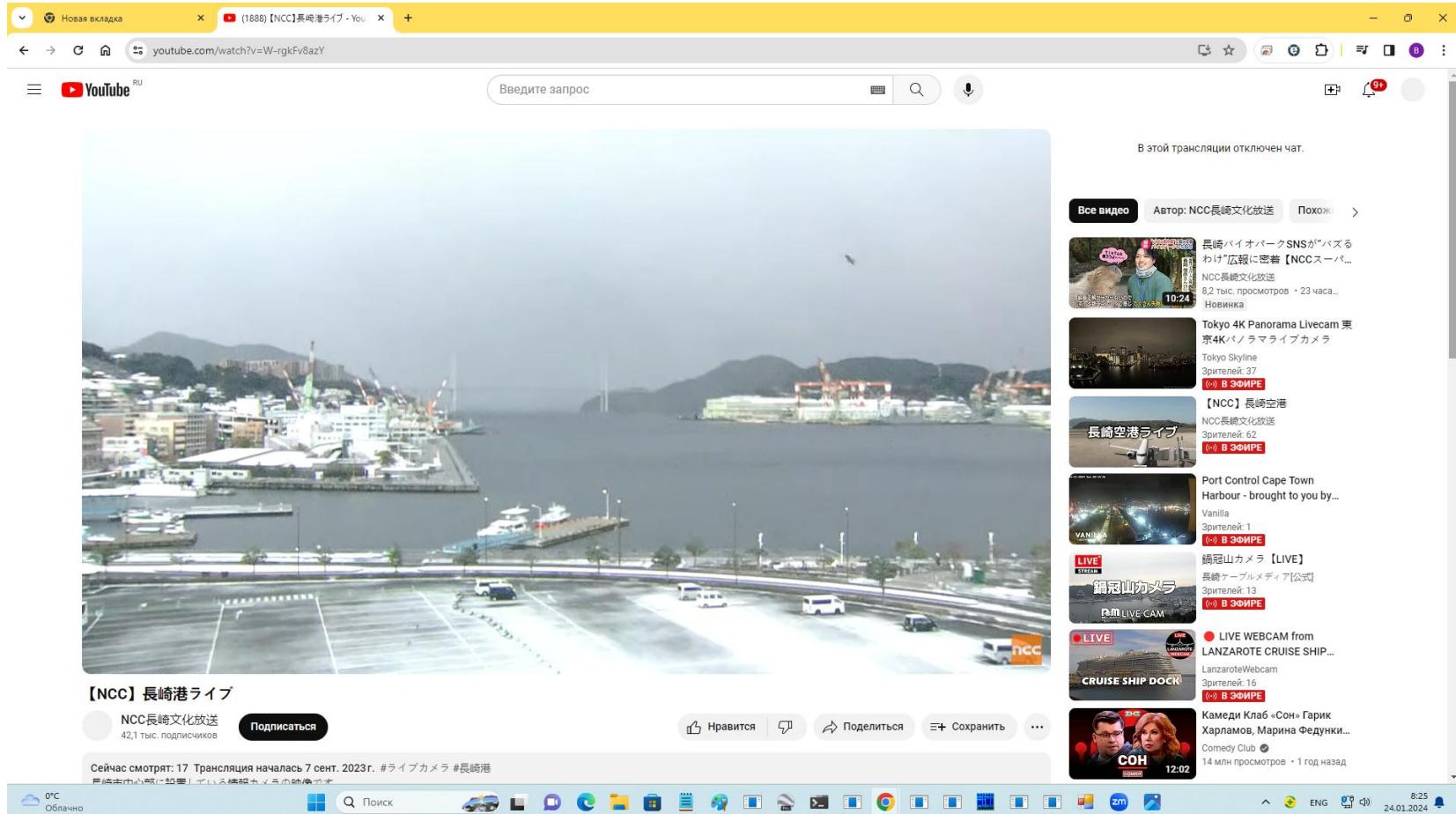
Такие приборы применяются на станциях Глобальной системы наблюдения уровня моря GLOSS. Всего в мире таких станций более 1300, данные с них доступны для скачивания в интернете - <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>. Нами было проведено несколько серий QAVIS-измерений в районах, где имелась возможность сопоставить наши данные с данными близко расположенных GLOSS станций. Они подтвердили работоспособность QAVIS и в некоторых случаях высокую точность измерений уровня, среднеквадратичное отклонение от GLOSS-данных до 1 см и менее.

Рассмотрим далее один такой пример

Измерения колебаний уровня моря в порту Нагасаки

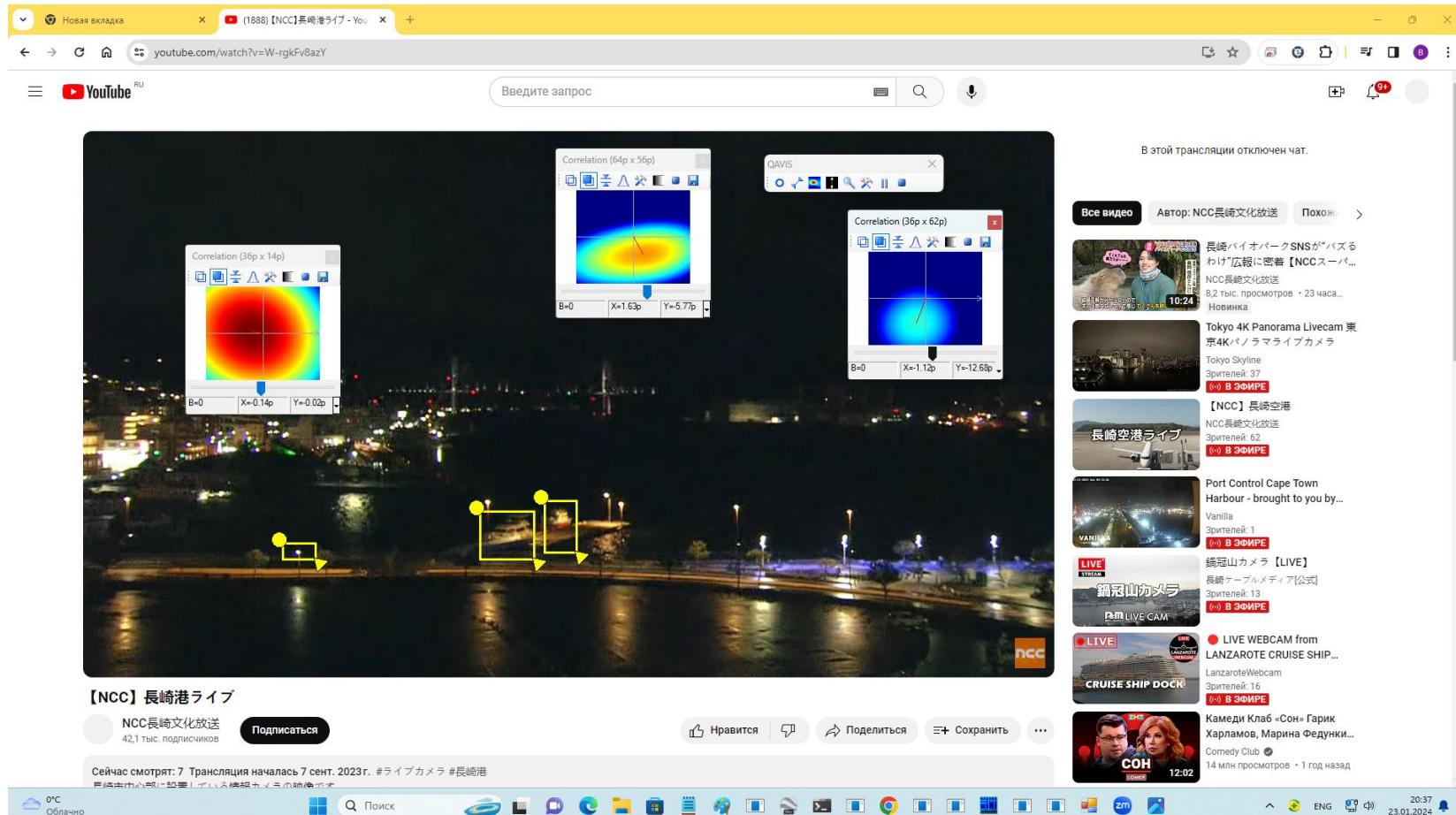
20 января 2024 г., видеотрансляция youtube.com/watch?v=SVpsCVjzoil

В центре два судна у пирса, они подходят на роль отслеживаемых маркеров, однако днем за ними следить сложно, они часто отходят от пирса



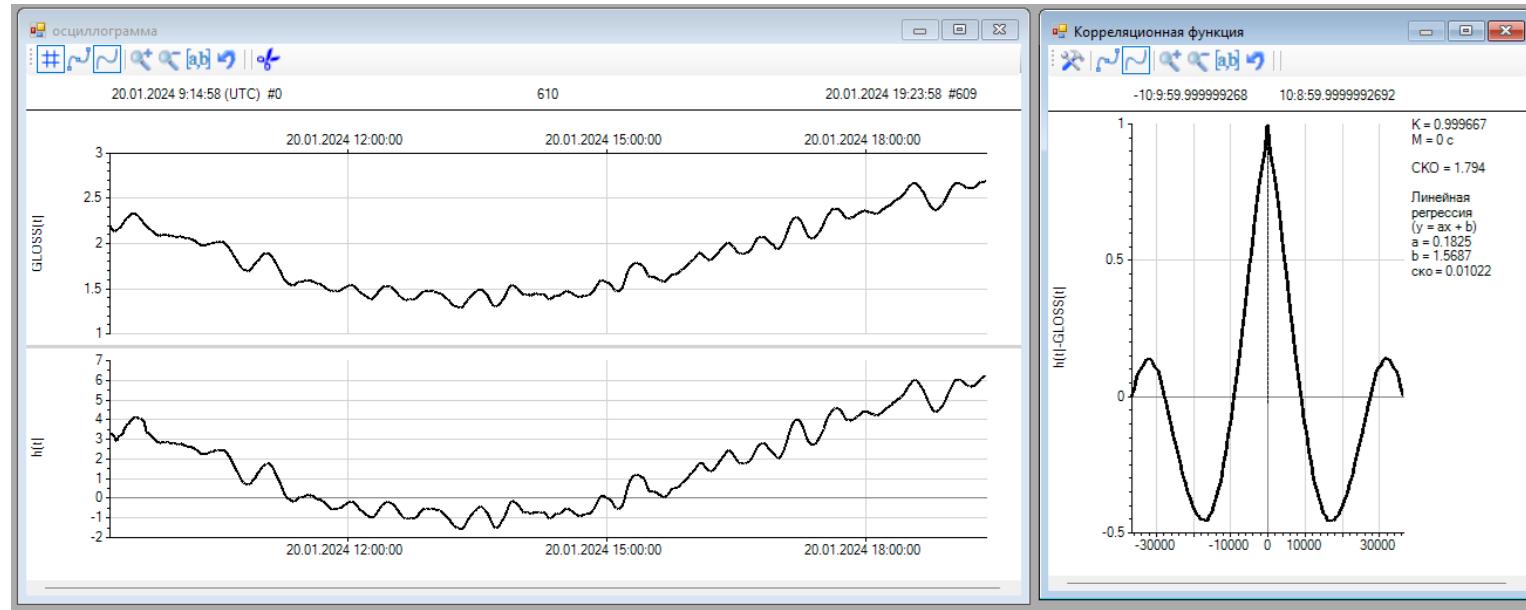
Все измерения проводились в ночное время (ночь на 21 января)

С помощью инструмента Корреляция измеряются вертикальные движения судов на воде. Применяется процедура субпиксельного трекинга, кратность интерполяции $Q=100$. Расстояние от камеры до судов 200 м



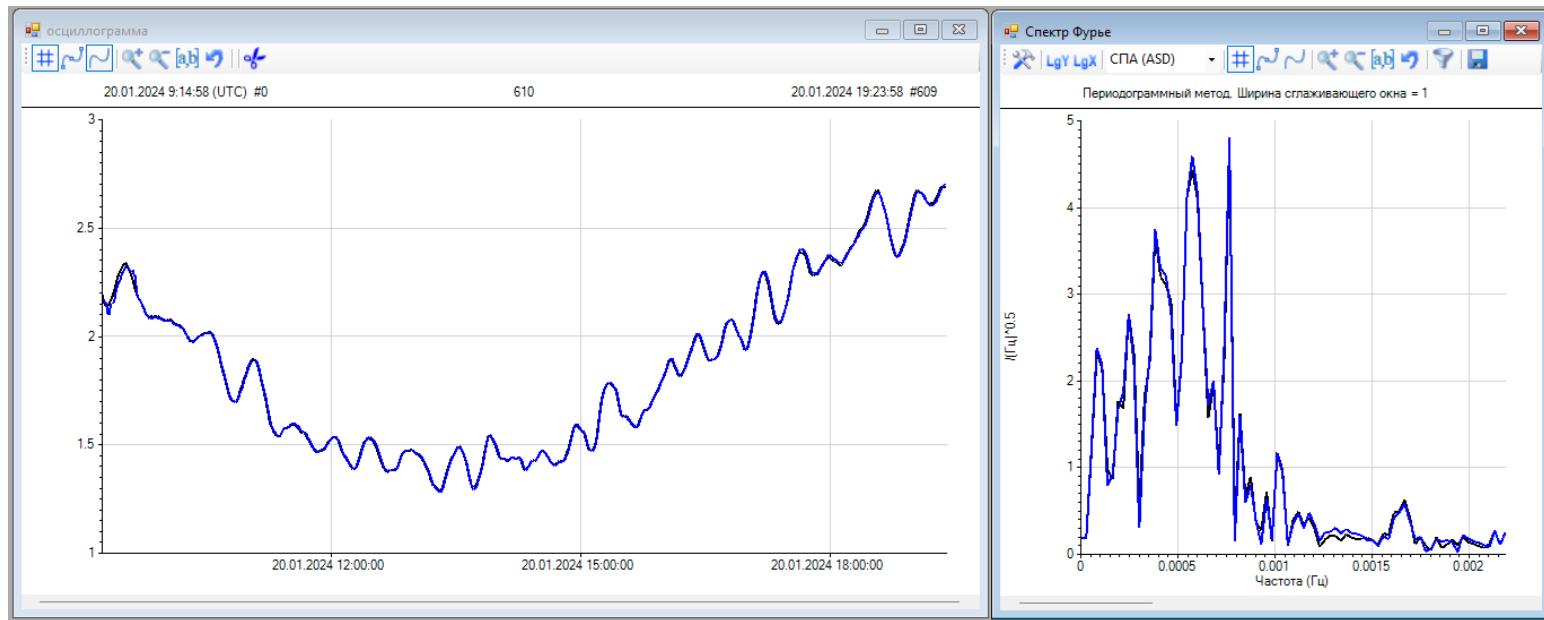
Совместный анализ колебаний уровня моря, измеренных по видео и уровнемером GLOSS-станции NAGA (расположена в 500 м от пирса)

Вверху GLOSS сигнал, внизу QAVIS;



Сигналы похожи, максимум нормированной корреляционной функции очень близок к 1, $K= 0.9996$. Однако сигнал $h(t)$ представлен в шкале пикселов экрана. Для его перевода в метрическую шкалу вместо описанной ранее процедуры оценивания размера пикселя сразу используем рекомендуемое коррелятором уравнение линейной регрессии $H(t)=0.1825 \times h(t) + 1.5687$. В нем фактически используется наименеещий размер пикселя $d=0.1825 \text{ м} = 18.25 \text{ см}$, который обеспечивает минимально возможное среднеквадратичное отклонение между QAVIS и GLOSS данными.

Осцилограммы и спектры 10-часового сигнала колебаний уровня моря в заливе Нагасаки, измеренного японским уровнемером на GLOSS –станции naga (черный цвет) и программой QAVIS на Интернет-видеотрансляции (синий цвет) с наложением друг на друга .



Очевидно, что и сигналы и их спектры практически совпадают. Среднее квадратичное отклонение между сигналами GLOSS и QAVIS равно 1.02 см.

Общий вывод: применение реализованной в QAVIS методики субпиксельного корреляционного трекинга вертикальных движений маркерных объектов на водной поверхности, наблюдаемых на Интернет видеотрансляциях, позволяет проводить дистанционные измерения колебаний уровня моря с качеством, сопоставимым с GLOSS-станциями

Примеры регистрации волнения и колебаний уровня воды в озерах

В какой-то момент возникла идея провести подобные измерения колебаний уровня воды в озерах на базе анализа соответствующих Интернет видеотрансляций. Поскольку в GLOSS нет данных об уровне воды в озерах, мы подбирали трансляции с озер, для которых имелась историческая либо научная информация об особенностях колебаний уровня. Прежде всего, мы интересовались сейшами, их периодами и амплитудами.

Далее будут рассмотрены 5 примеров

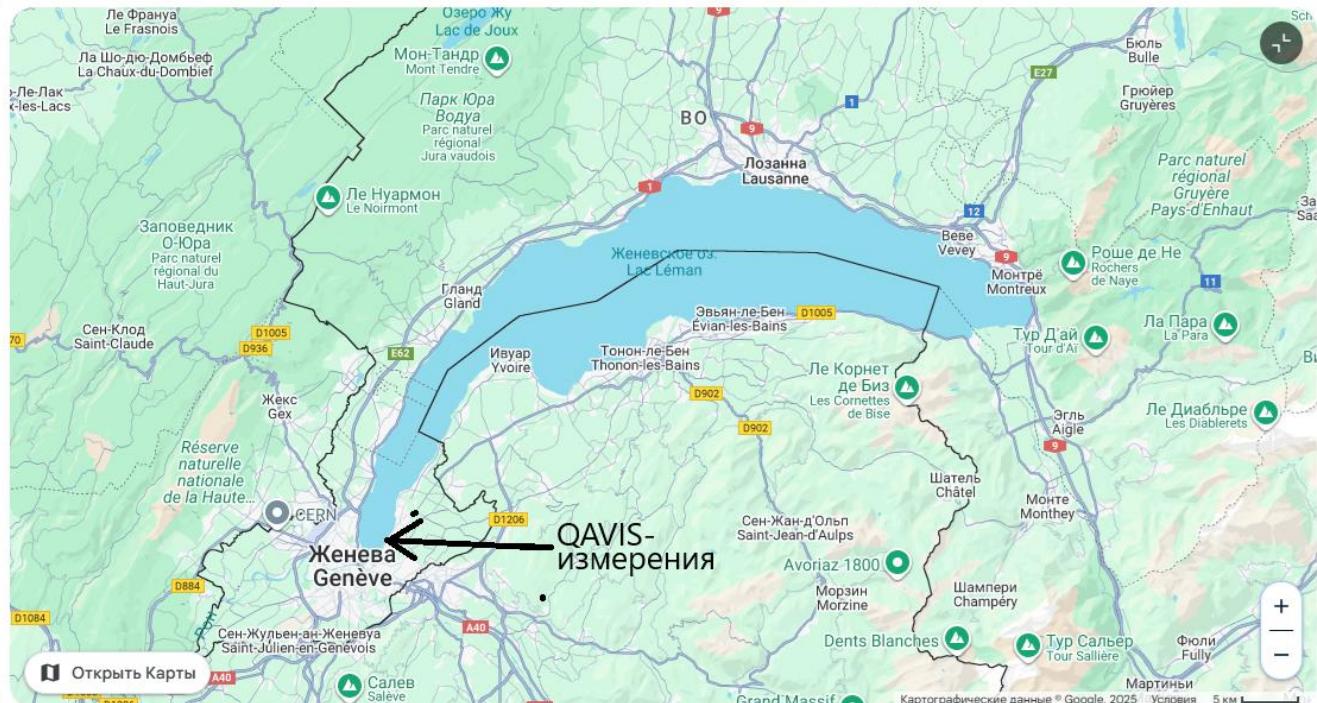
Примеры регистрации волнения и колебаний уровня в озерах

Швейцария, Женевское озеро (озеро Леман)



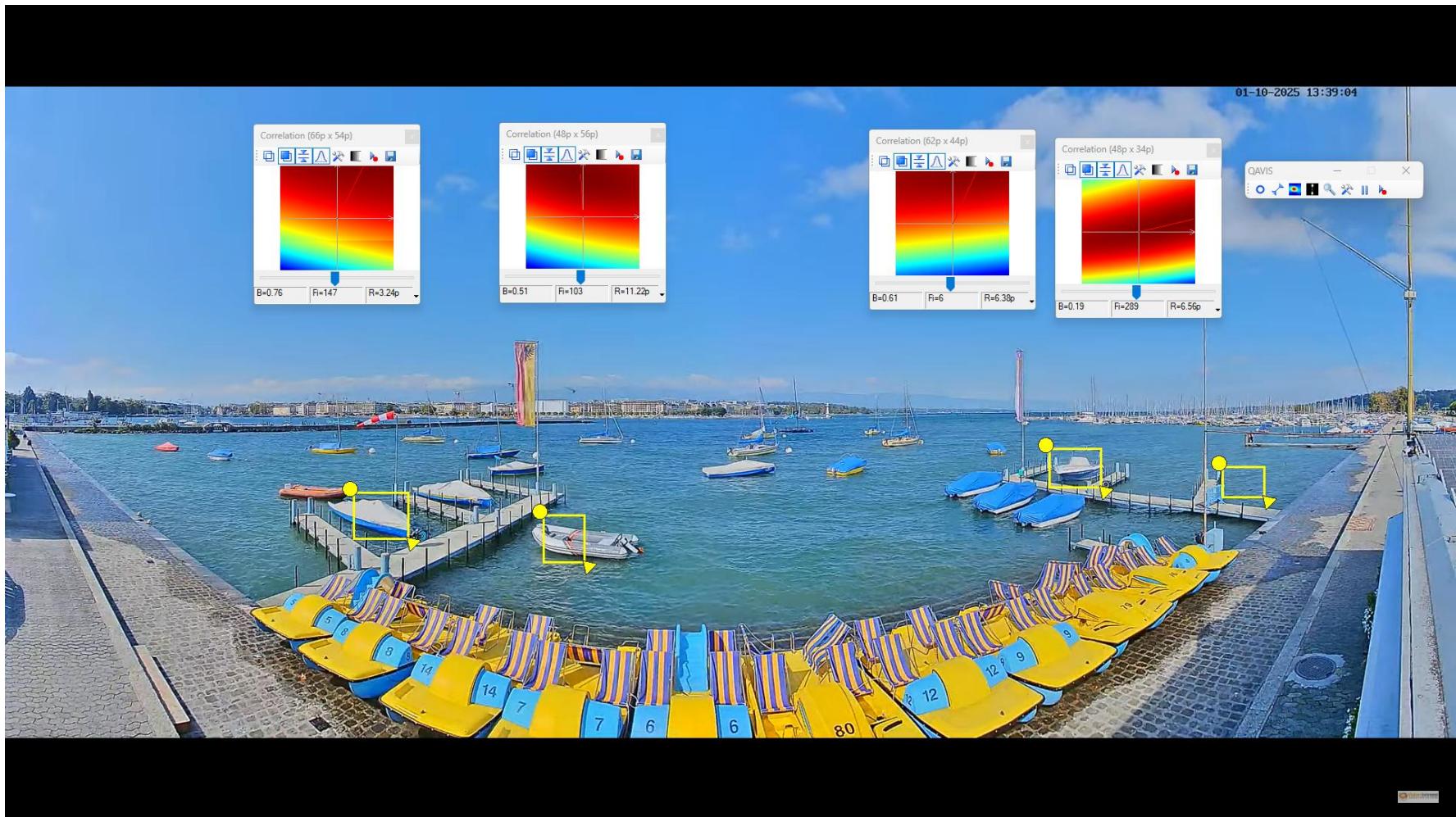
Франсуа-Альфонс Форель
1841 - 1912 гг.

На примере озера Леман впервые научно объяснил явление сейшер и предложил для расчета их периодов использовать формулу Мериана
 $T = 2L / (n \sqrt{gH})$
Измерил периоды двух первых мод сейшер озера Леман 73 и 35 мин



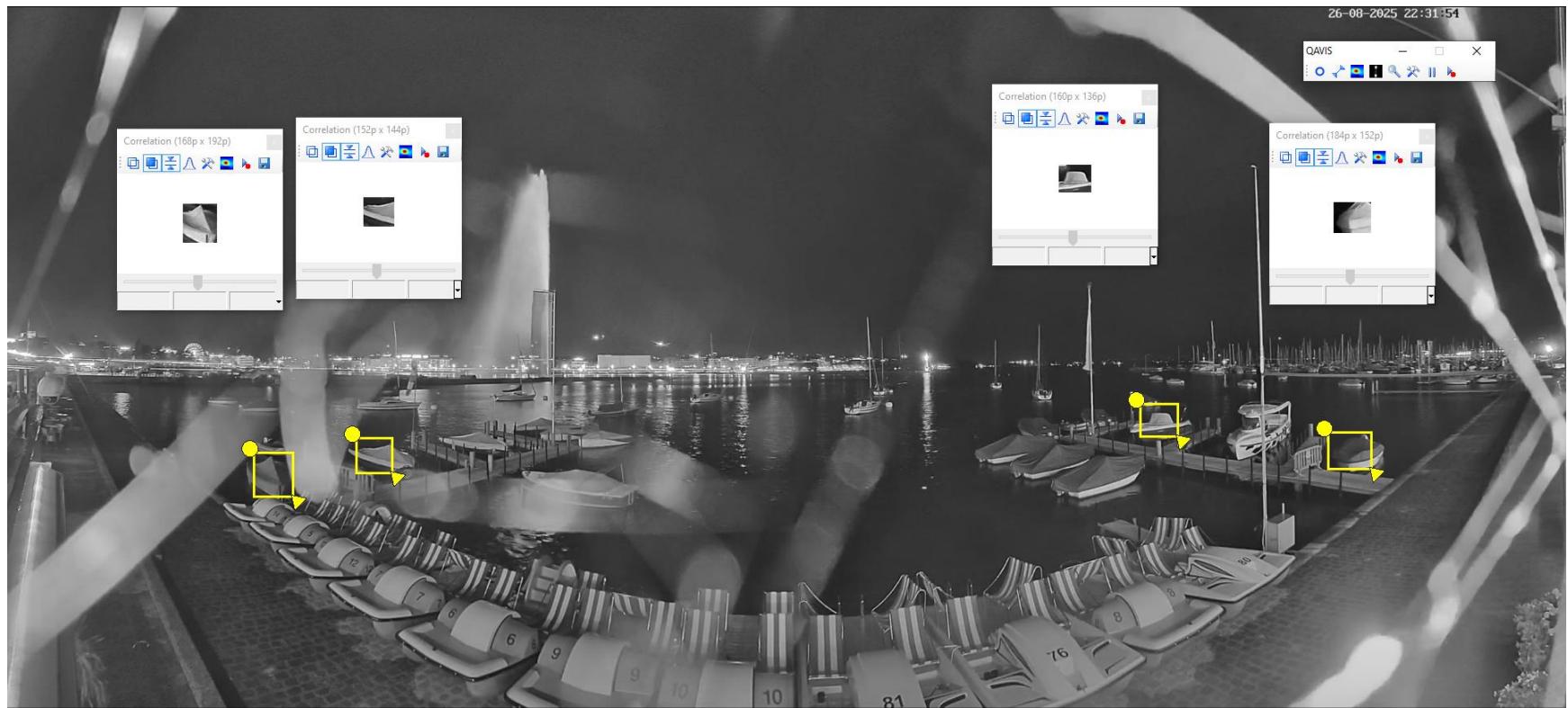
Видеотрансляция со стоянки прогулочных лодок на берегу озера <https://www.youtube.com/watch?v=-3rTCWinLI4>

Программа QAVIS отслеживает вертикальные движения 4 лодок



Дневные измерения осложняются использованием лодок для прогулок туристами и зависимостью теней от положения солнца.

Поэтому измерения проводились в основном ночью

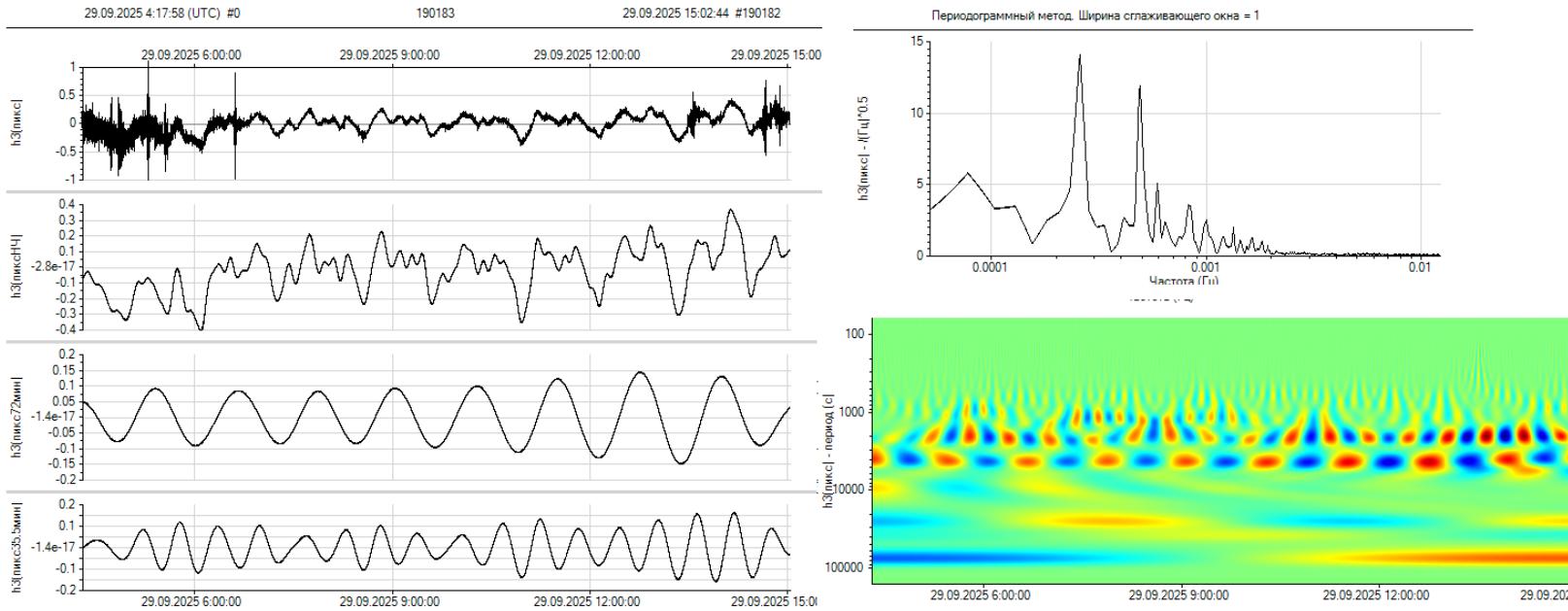


Анализ 11-часовой записи вертикальных движений третьей слева лодки $h3(t)$

ночь с 28 на 29 сентября 2025 г.

Применялся алгоритм субпиксельного трекинга с кратностью $Q=100$

Результаты совпадают с результатами Ф.А. Фореля 140-летней давности. В спектре QAVIS-сигнала видны пики первой и второй мод сейшевых колебаний озера - 72 и 35,5 мин. На вейвлетограмме Морле видны две полосы чередующихся экстремумов на этих же периодах.

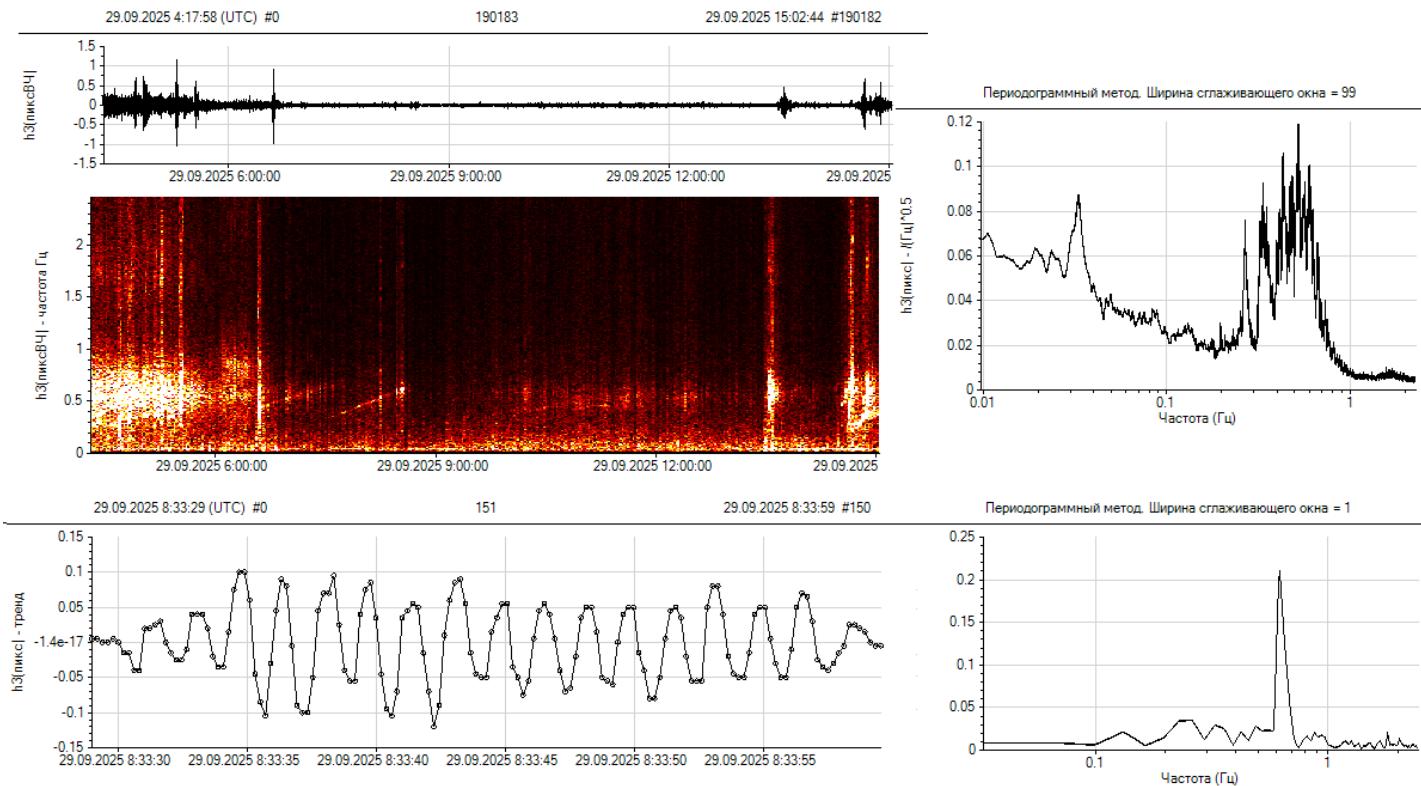


Слева показаны исходный сигнал, сигнал колебаний уровня (после удаления ВЧ компонент поверхности волнения), первая (72 мин) и вторая (35.5. мин) моды сейш озера. Все сигналы отображены в пикселях, для перевода в см их необходимо умножить на масштабный коэффициент 4 см/пиксель. Средние высоты мод : 1.1 и 1.2 см, соответственно. Всего летом и осенью 2025 г. было проведено около 20очных наблюдений. В них тоже регистрировались сейши, близкие к 72 и 35,5 мин, высоты варьировались от 0.6 до 5 см.

Анализ поверхностного волнения

ВЧ часть спектра зарегистрированного сигнала несет информацию о поверхностных волнах – инфрагравитационных (пик на 30сек), ветровых (широкий пик 1.5 – 5 сек), корабельных. Спектрограмма дает представление о временной динамике частотных свойств волнения. Волнение было активно в начале и конце записи. Два линейных трека длительностью около 1 часа в первой половине спектрограммы – отклики корабельных волн от судов, проходивших примерно в 20 км от лодочной стоянки.

В нижней части слайда для наглядности приведены осциллограмма и спектр 30-секундного фрагмента сигнала волнения. Основной период колебаний 1.7 сек



Озеро Невшатель (Швейцария)

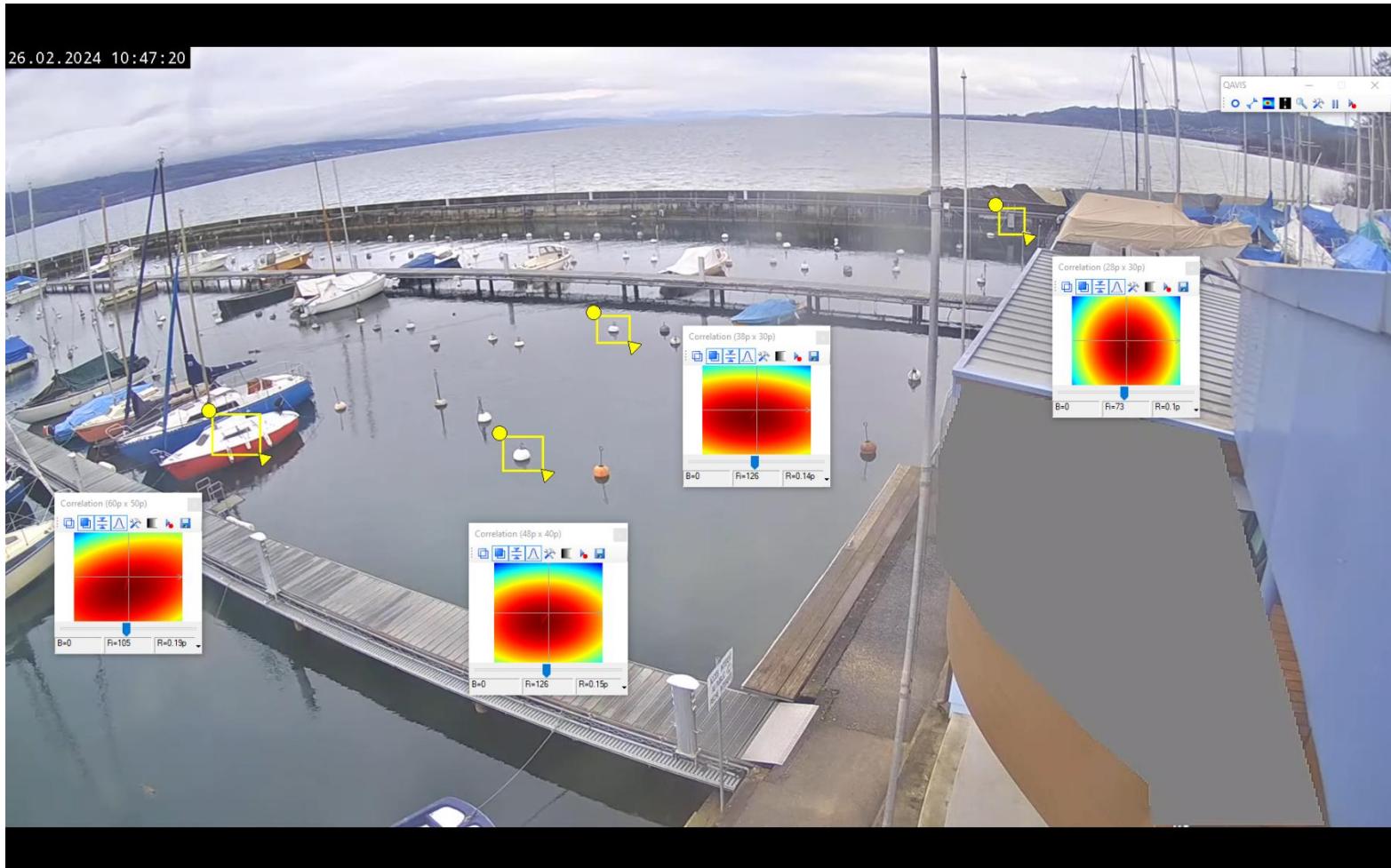
Немного севернее озера Леман



Видеотрансляция из порта Ивонанд

youtube.com/watch?v=p0YDJ55WhCo

Регистрация вертикальных движений двух буев и лодки
Масштабы: примерно 3 см/пикс (лодка), 2.5 и 4 см/пикс (буи)



Историческая справка

Первое исследование сейш озера Невшатель выполнили швейцарские ученые **Эдуар Сарасен и Леон дю Паскье** в 1891-1894 годах. В порту Ивонанд измерения проводились в 1894 г. Общий вывод – озеро неблагоприятно для изучения сейш из-за их малой амплитуды и особенностей рельефа дна. Сейши с периодами порядка 40 минут возникают, но делятся недолго. Особенность порта Ивонанд – наличие устойчивых поперечных сейш с периодом 8-9 минут.

Séance du 20 décembre 1894

LES SEICHES DU LAC DE NEUCHATEL

PAR ED. SARASIN & LÉON DU PASQUIER

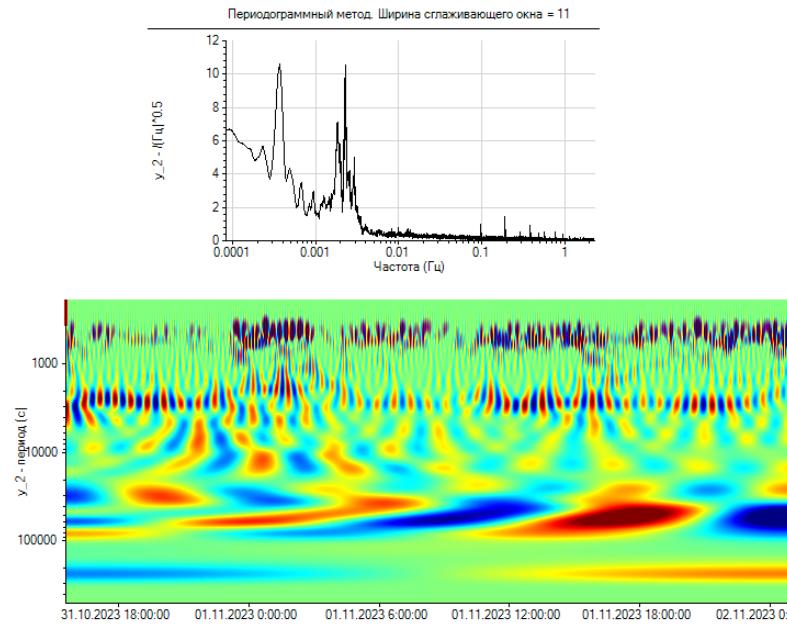
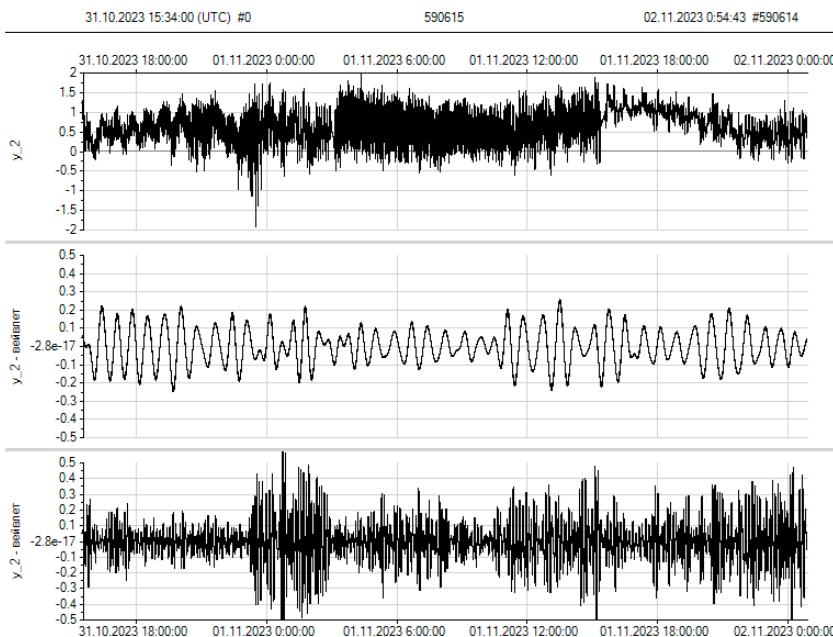
Nous constatons avant tout que la détermination du rapport des périodes uninodales et des binodales n'a pu être faite d'une manière exacte. Le lac de Neuchâtel paraît être fondamentalement défavorable à l'étude des seiches, qui y sont de faible amplitude et s'éteignent rapidement dans des interférences compliquées. Sans doute, les irrégularités du relief du fond du lac constituent la cause principale de ces perturbations au développement normal des seiches.

"Озеро Невшатель, по-видимому, принципиально неблагоприятно для изучения сейш, которые имеют там малую амплитуду и быстро исчезают среди сложных интерференционных картин"

Анализ сигнала вертикальных движений лодки (левый маркер)

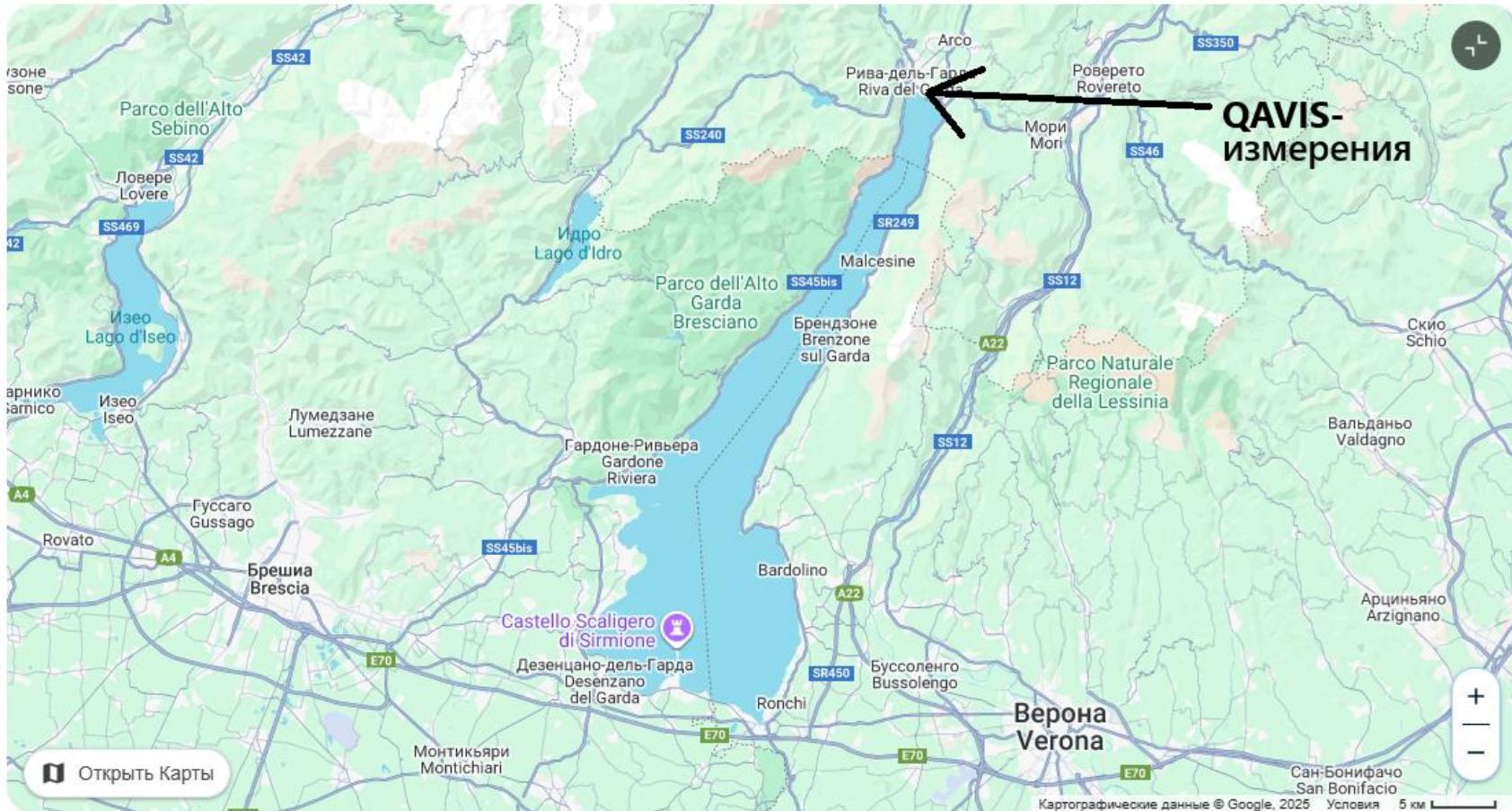
Начало измерений; 31.10.2023, длительность 33 часа

Слева вверху сигнал $h(t)$ в пикселях. 1 пиксел = 3 см. Справа – спектр и вейвлетограмма. Видны отклики периодичностей 46 минут (продольные сейши) и 7-9 минут (поперечные сейши). Слева ниже сигналы сейш 46 и 7-9 минут



Всего в порту Ивонанд было проведено около 10 подобных многочасовых QAVIS-измерений. Результаты подтверждают выводы в статье Сарасена и Паскье 1894 г. Сейши с периодами 40-50 минут малы по амплитуде и неустойчивы. Приведенный здесь случай - исключение. Поперечные 7-9 минутные сейши наблюдались во всех случаях и, как правило, превышали по амплитуде продольные сейши.

Озеро Гарда, Италия

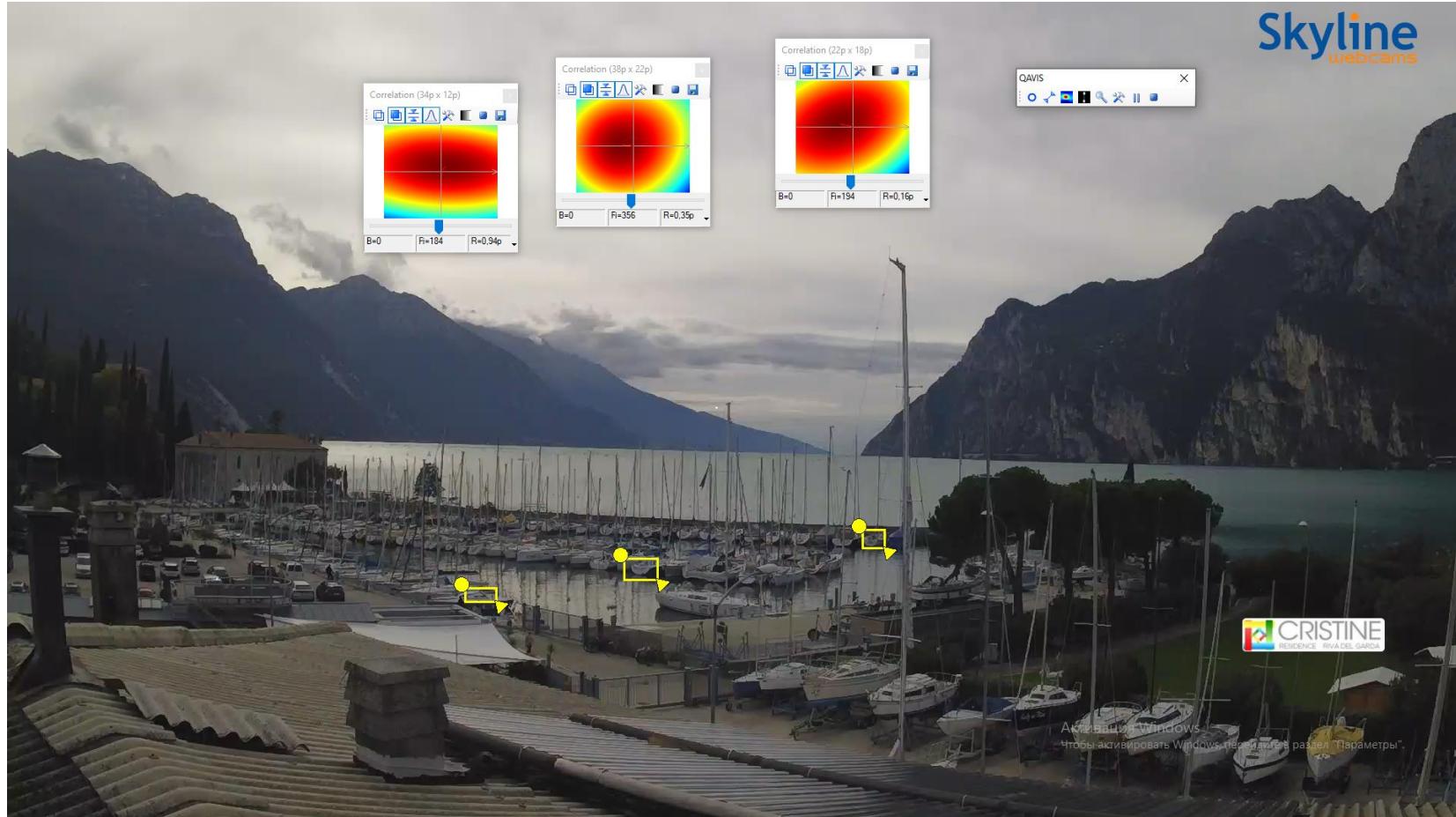


Видеотрансляция из порта Сан-Николе (оз. Гарда)

<https://www.skylinewebcams.com/ru/webcam/italia/trentino-alto-adige/trento/riva-del-garda-porto-san-nicolo.html>

Регистрация вертикальных движений трех лодок

Основная - вторая. Масштаб: примерно 5 см/пикс

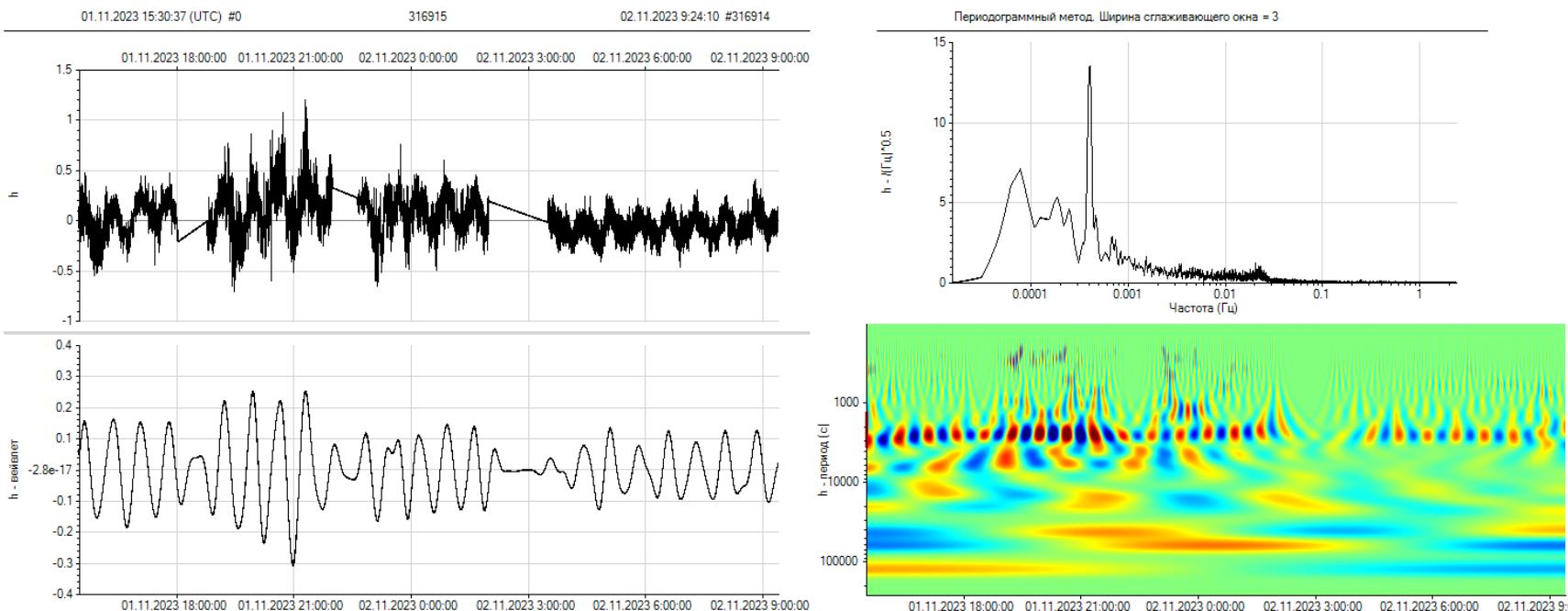


Анализ сигнала вертикальных движений второй лодки

Начало измерений: 01.11.2023 05:30:00, длительность 18 часов

Слева вверху сигнал $h(t)$ в пикселях. 1 пиксел = 5 см. Справа – спектр и вейвлетограмма. Видны отклики периодичности 42 мин 50 сек.

Слева внизу сейшевая компонента, выделенная методом вейвлет-фильтрации



Высота сейшевых колебаний: средняя 0.26 пикселя (1.3 см), макс. 0.56 пикселя (2.8 см)

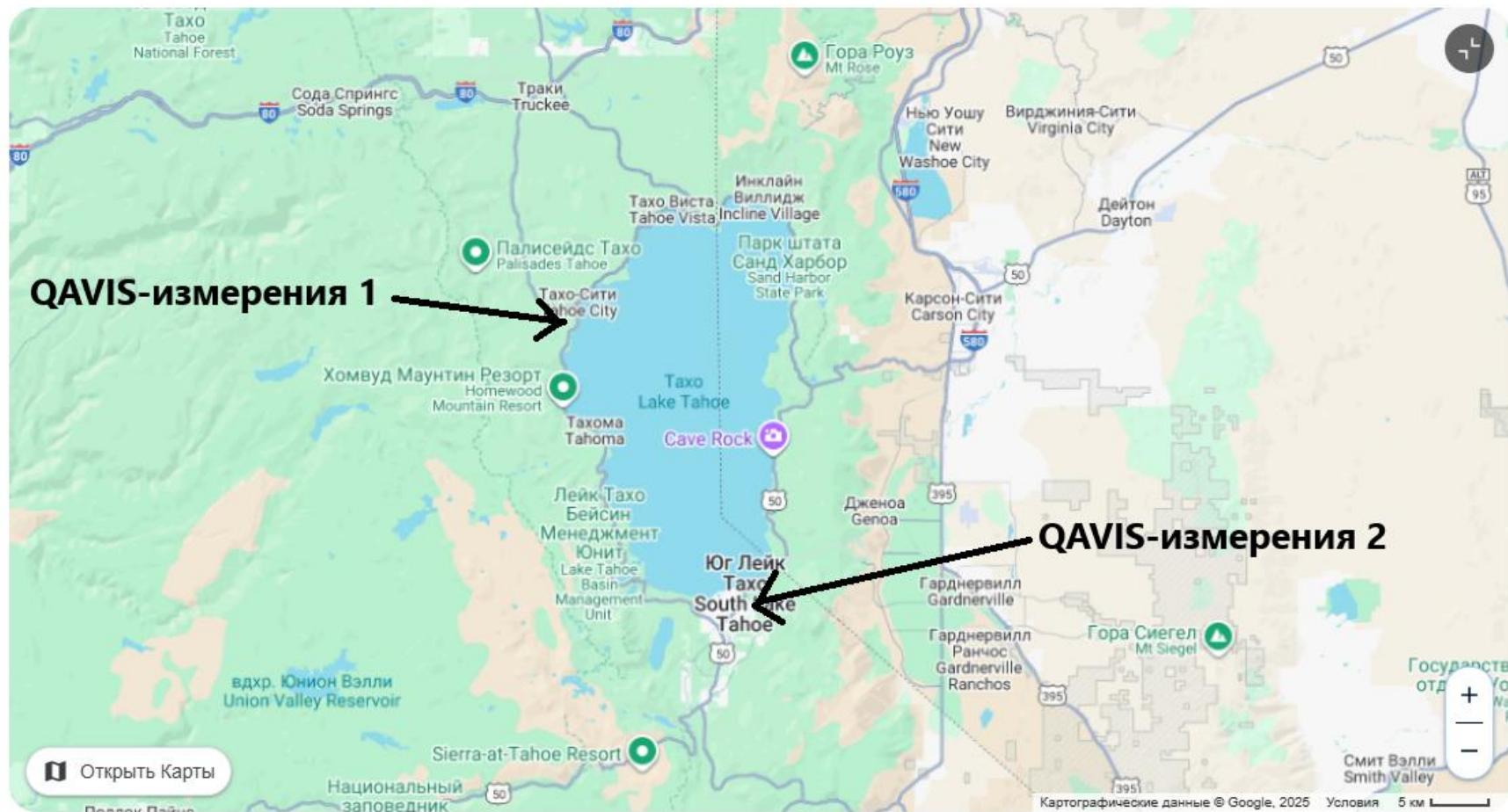
В энциклопедии [January 2003, McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology

Edition: Chapter: Seiche. Alfred Wuest / Alfred Wuest, David M. Farmer/] приведена

информация о периодах сейш ряда озер, в озере Гарда период 42.9 минуты, что совпадает с данными QAVIS-измерений

Озеро Тахо, США

Расположено в США в горном массиве на границе между штатами Калифорния и Невада. Размеры 36 x 19 км, глубина сред. 313 м, макс. 502 м.



В статье [1], посвященной разработке модели поверхностных сейш озера Тахо, представлены результаты измерений уровня воды в 10 точках на побережье озера. Было выделено шесть устойчивых сейшевых мод с периодами от 18 до 10 минут.
 $M1=18.4$; $M2=16.5$; $M3= 13.4$; $M4= 11.6$; $M5=11.1$; $M6=10.1$ мин

В разных точках измерений проявлялись от 1 до 3 мод. Нами в 2023 и 2025 годах было найдено 2 подходящие для QAVIS-анализа интернет-трансляции, в порту г. Тахо Сити и на пляже отеля Beach Retreat & Lodge at Tahoe на южном берегу озера. Они оказались близки к двум точкам реальных наблюдений (см. статью).

Точка ТС (северо-запад) – проявляются моды $M1$, $M2$.

Точка ТВ (юго-юго-восток) – проявляются моды $M1$, $M3$.

1. Observations and modeling of the surface seiches of Lake Tahoe, USA

Roberts, Derek C. ; Sprague, Heather M. ; Forrest, Alexander L. ; Sornborger, Andrew T. ; Schladow, S. Geoffrey
Aquatic Sciences, 2019-07, Vol.81 (3), p.1-, Article 46

Видеотрансляция в порту Тахо сити

hdontap.com/index.php/video/stream/north-lake-tahoe-live

Регистрация вертикальных движений причальных мостков

Масштабы: примерно 3-4 см/пикс

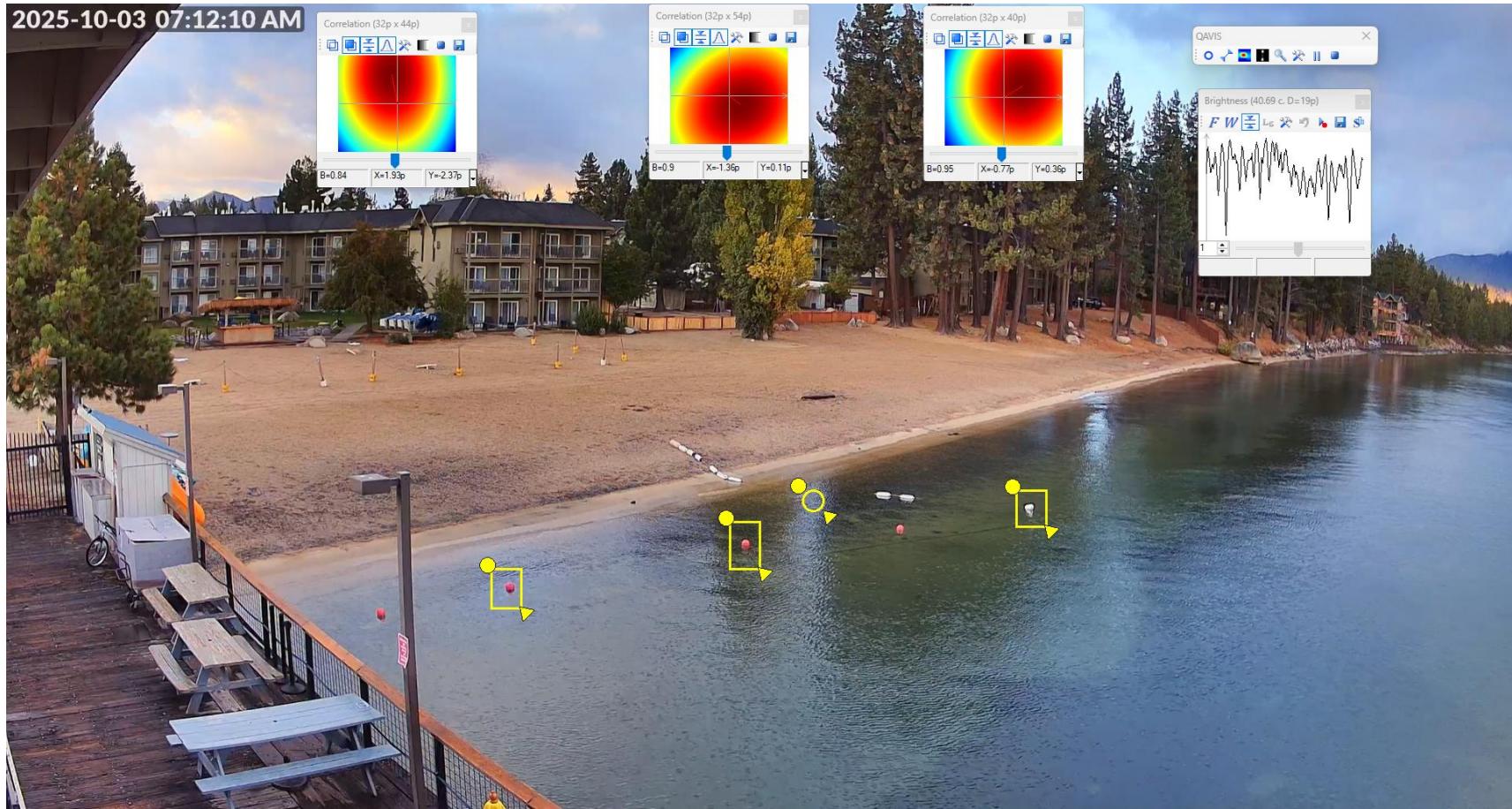


Видеотрансляция с пляжа отеля Tahoe Beach Retreat

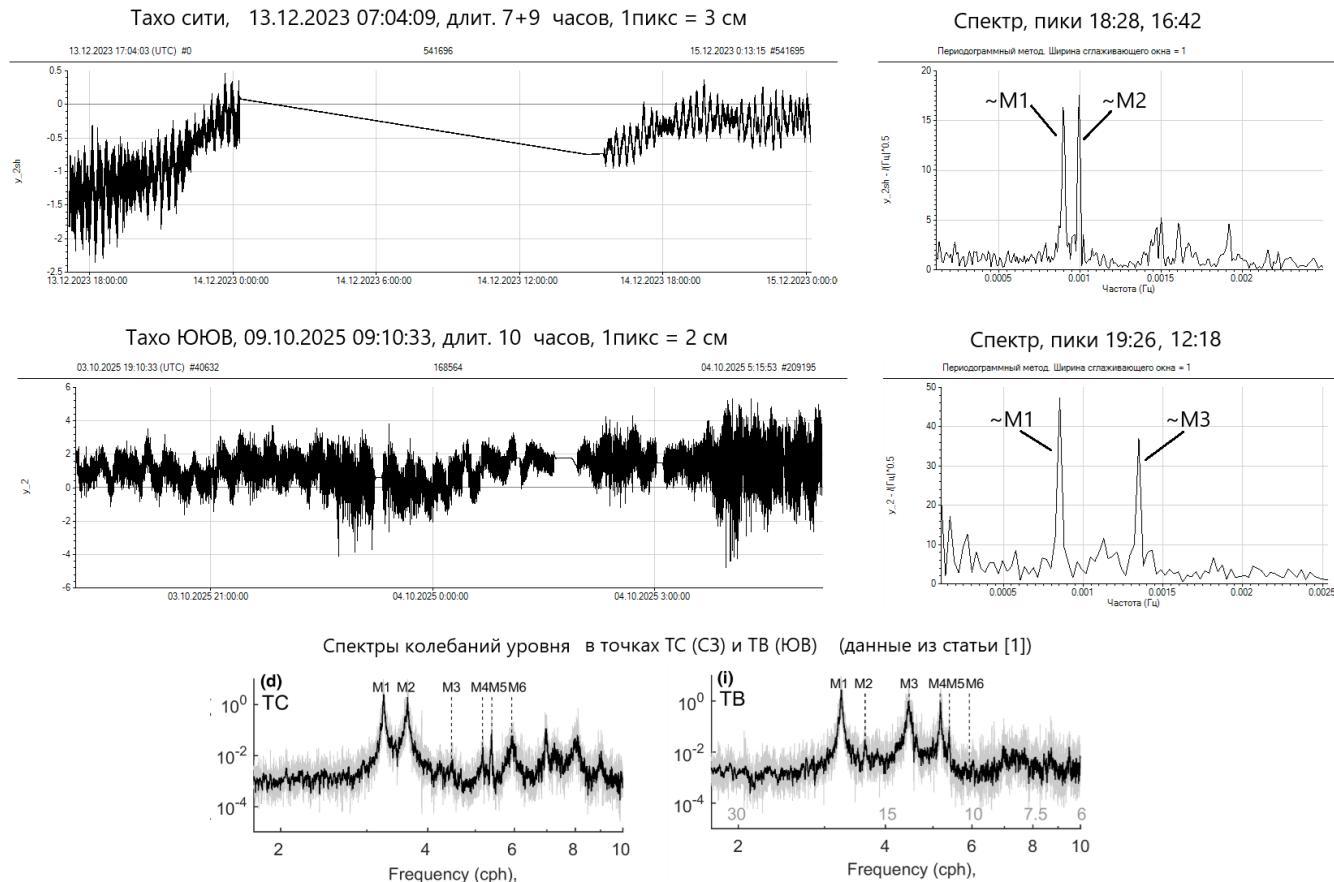
tahoebeachretreat.com/lake-cam

Регистрация вертикальных движений пляжных буйков.

Масштаб: 2 см/пикс



Анализ результатов измерений сигналов вертикальных движений маркеров на двух трансляциях

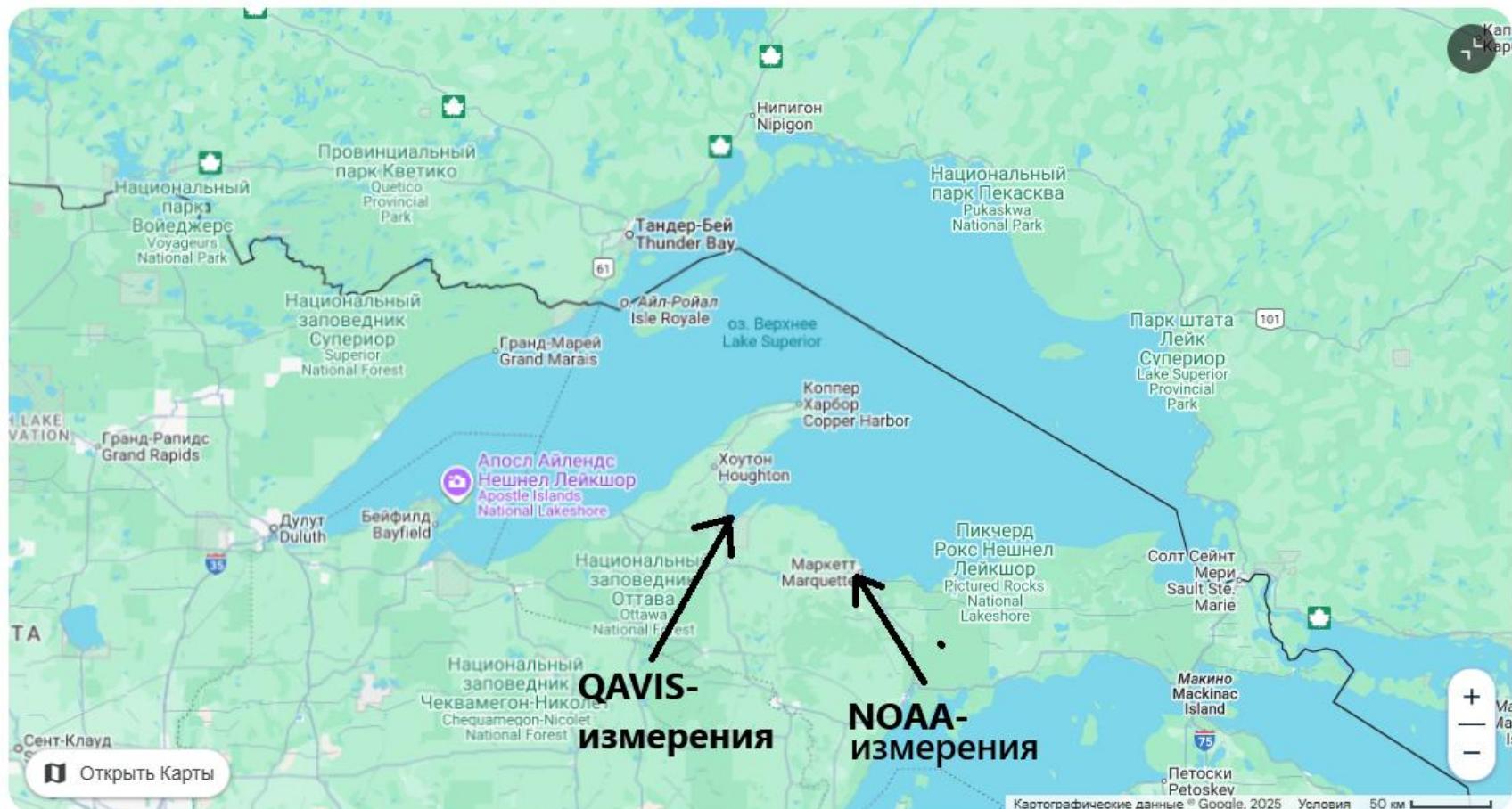


Пики в спектрах QAVIS измерений близки к модам сейш на ближайших к точкам трансляций гидрологических станций: в порту Тахо к модам M1, M2 на станции ТС, на пляже отеля Beach Retreat & Lodge at Tahoe к модам M1, M3 на станции ТВ.

Общий вывод: QAVIS измерения на озере Тахо хорошо согласованы с измерениями, описанными в [1]

Озеро Верхнее (Superior), США

Озеро Верхнее – одно из Великих озер на границе США и Канады. QAVIS измерения проводились на видеотрансляции с пирса деревни Лаэнс на южном побережье озера. Результаты сравнивались с NOAA измерениями в городке Маркетт.

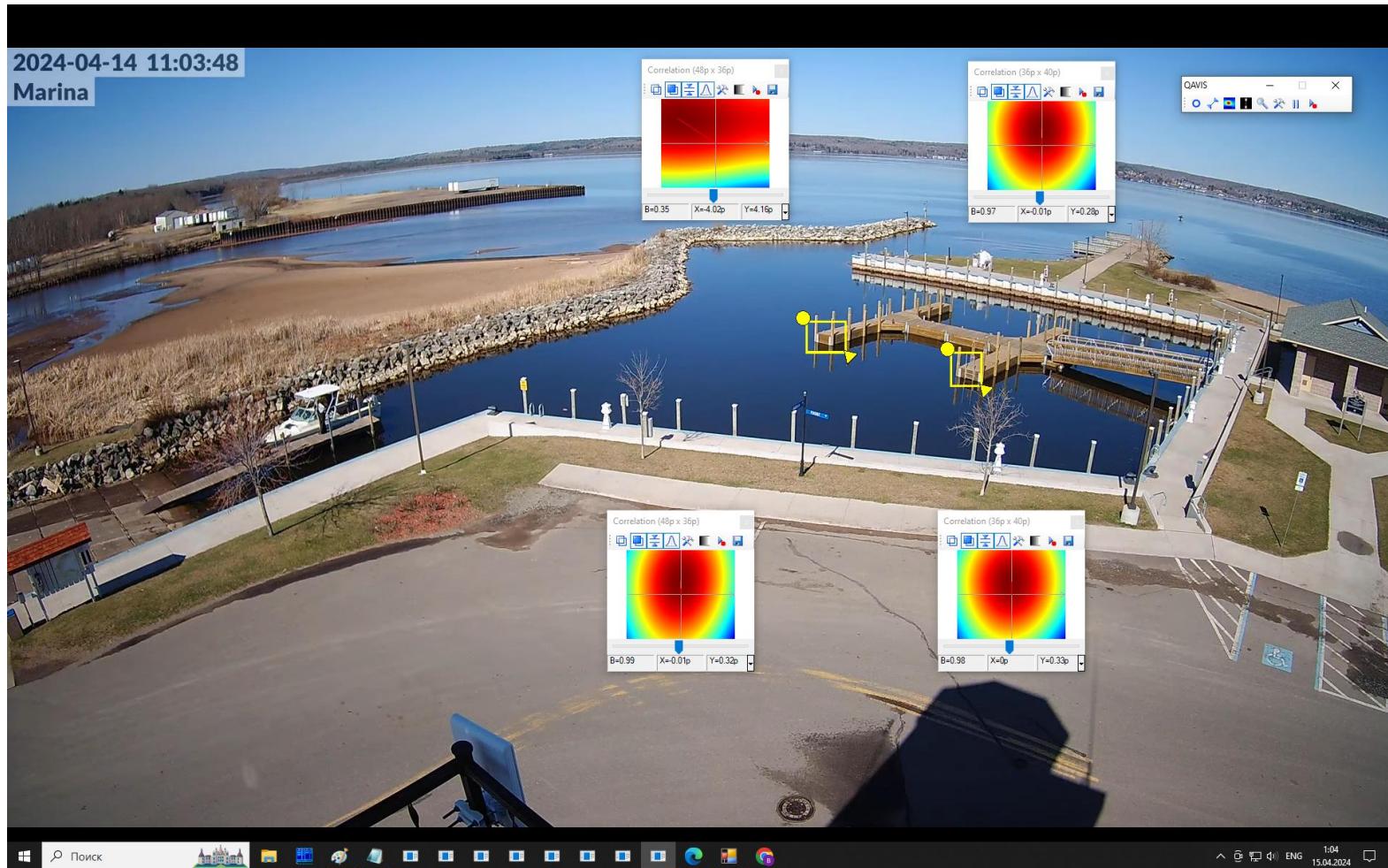


Видеотрансляция с лодочной стоянки деревни Лаэнс

<https://www.youtube.com/watch?v=wSBp4zkIXwo>

Регистрация вертикальных движений двух причальных мостков. Измерения в каждой точке дублируются, одно с ночных эталоном, второе с дневным

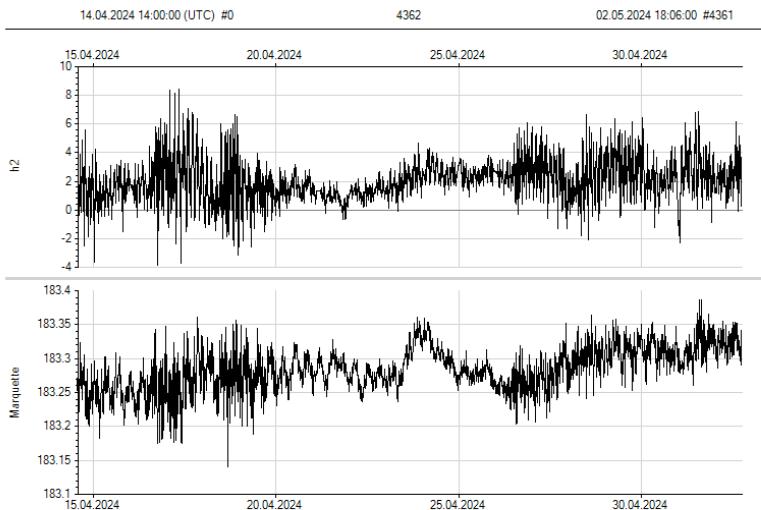
Масштаб: примерно 6 см/пикс



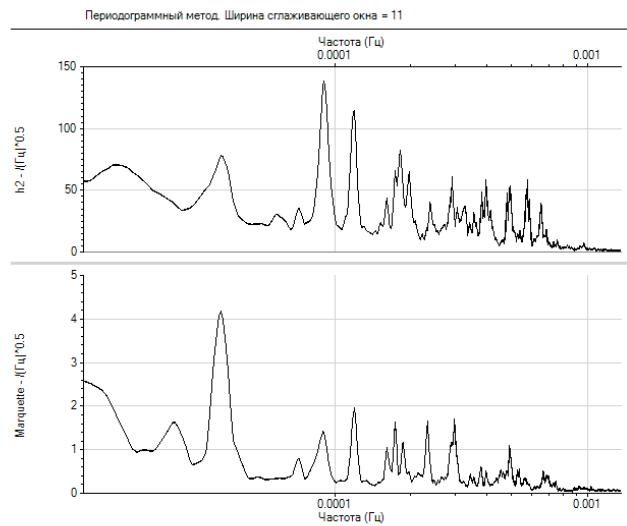
Анализ результатов синхронных QAVIS и NOAA (tidesandcurrents.noaa.gov/waterlevels.html) измерений

Начало 14 апреля 2024, длительность 18 суток. Шаг дискретизации 6 минут (стандарт NOAA)

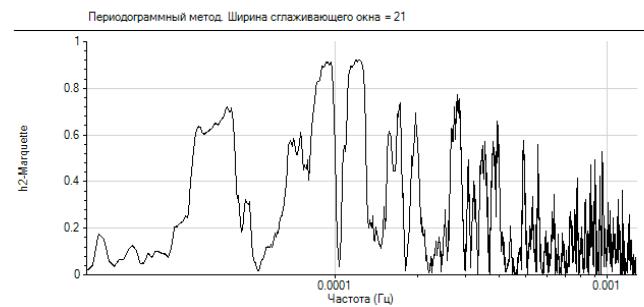
Колебания уровня и спектр в Лаэнс
Qavis – измерения по видео -трансляции



Колебания уровня и спектр в Маркетте.
Данные взяты с сайта NOAA



Спектр когерентности между сигналами колебаний уровня в Лаэнсе и Маркетте (!!! расстояние 100 км, совершенно разные методики измерений)



В обоих точках (Лаэнс и Маркетт) синхронно проявляются 12 сейш с периодами (7ч55мин, 3ч50мин, 3ч04мин, 2ч20мин, 1ч43мин, 1ч35мин, 1ч29мин, 1ч11мин, 56мин, 43мин, 33мин, 25мин). В спектре когерентности на этих же частотах наблюдаются высокие (больше 0.5) значения. Наиболее когерентны сейши с периодами 3ч04мин и 2ч20мин, когерентность 0.92.
Общий вывод: QAVIS измерения в Лаэнс согласованы с NOAA измерениями в Маркетте

Заключение

1. Представлена простая в использовании программная технология QAVIS для измерения волнения и колебаний уровня в природных водоемах на основе анализа видеотрансляций морских либо озерных сцен с маркерами, колеблющимися на поверхности воды.
2. На примере анализа морской видеотрансляции в порту Нагасаки и сравнения с данными GLOSS-станции NAGA показано, что точность QAVIS-измерений уровня водной поверхности может быть сопоставимой с точностью профессиональных GLOSS станций (СКО между QAVIS и GLOSS сигналами составляет 1 см и менее)
3. Приведены результаты QAVIS-измерений на пяти озерах: Женевском, Невшатель, Гарда, Тахо и Верхнем (Superior). Показано, что все они хорошо согласованы с известным историческим либо научным сведениям о колебаниях уровня воды в соответствующих озерах.
4. Полагаем, что представленная технология может быть полезной для гидрологов суши - лимнологов, а также для разработчиков спутниковых методов измерения волнения и колебаний уровня воды в озерах для отладки этих методов на основе сравнения с синхронными подспутниковыми QAVIS-данными

Благодарю за внимание