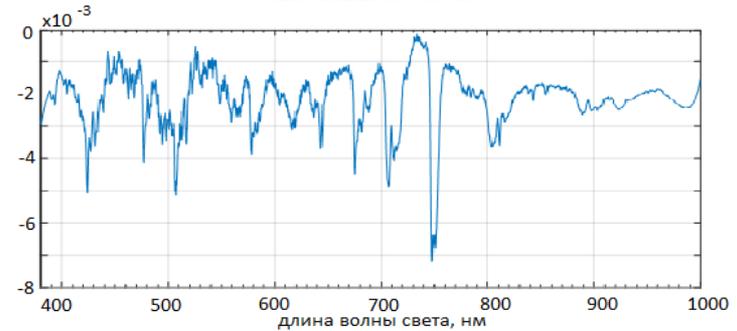
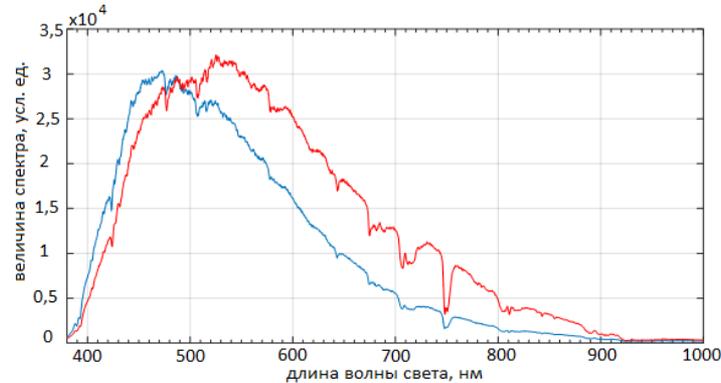
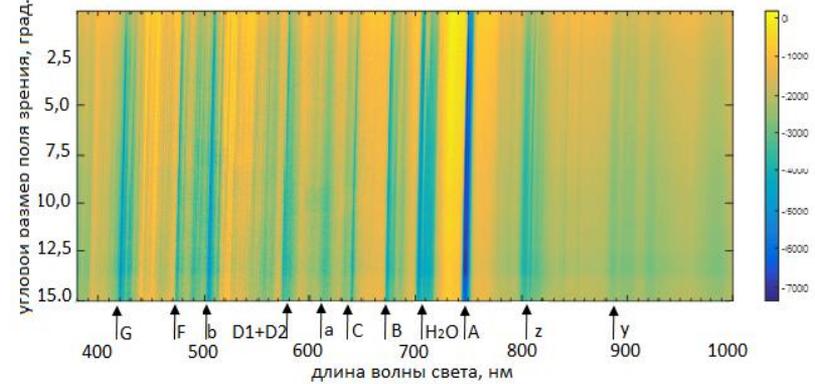
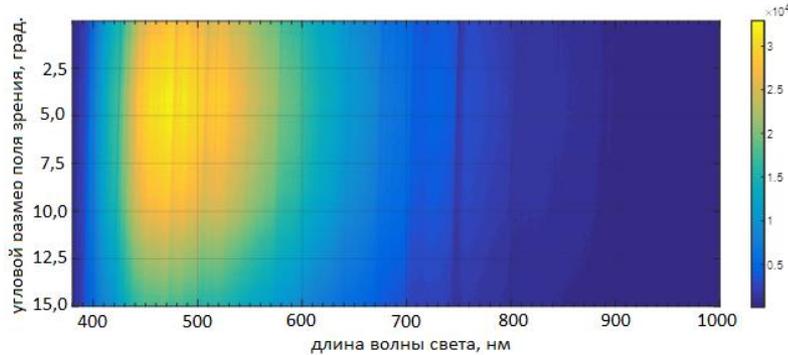


Диагностика водного бассейна с помощью сканирующего гиперспектретра

Титов В.И., Антонов А.А.

1) ИПФ РАН, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Как известно, гиперспектретры обычно используются для определения концентраций естественных примесей в водах водоёмов путем выполнения натурных измерений коэффициента яркости (КЯ) водной толщи в определенном спектральном интервале [1]. Сканирующий (так называемый push-broom) гиперспектретр позволяет получать пространственно – временные изображения морской поверхности в различных участках оптического спектра. Таким образом, сканирующий гиперспектретр обладает как бы «двойным» действием: он позволяет регистрировать оптические спектры излучения водных бассейнов вместе с диагностикой волнения бассейна по пространственно – временным изображениям взволнованной поверхности [4, 5]. Сканирующий гиперспектретр, использованный в натурных экспериментах, имеет спектральный диапазон от 380 нм до 1000 нм с разрешением 1,3 нм, поле зрения 15 градусов и частоту кадров до 120 кадр/сек. В настоящей работе проводится анализ характеристик волнения, полученных по оригинальной методике работы [6], которая не требует информации о параметрах оптического приемника и об абсолютных значениях яркости неба. Методика основана на формировании относительных флуктуаций яркости морской поверхности в приближении линейной зависимости яркости поверхности моря от уклонов волн.



Кадр гиперспектретра (вверху), ясное небо. По вертикали – угловой размер поля зрения, по горизонтали – длина волны света, значения спектра – в условных цветах. Видны вертикальные полосы – Фраунгоферовы спектральные линии солнечного излучения и полосы поглощения воды. Внизу – пример спектров излучения неба, полученных на Горьковском море при ясном небе (синяя линия) и в г.Нижнем Новгороде при сплошной облачности (красная линия). Частота кадров при записи составляла 10 Гц, спектры усреднялись по 10-ти кадрам. На спектрах на определенных частотах видны полосы поглощения. Аналогичные полосы присутствуют и в спектрах излучения водных бассейнов.

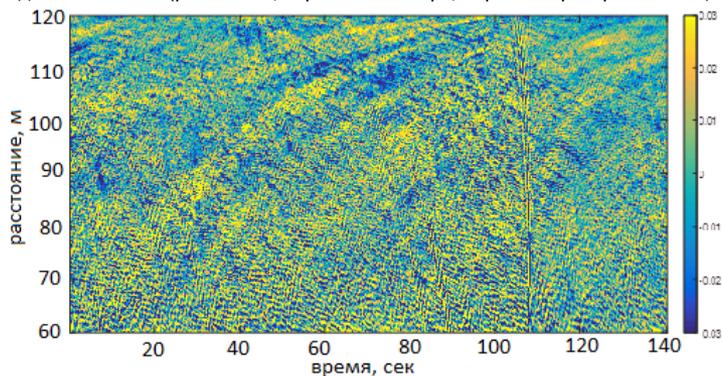
Разработана программа для выделения вертикальных полос на кадрах гиперспектретра. На рисунке вверху – Фраунгоферовы спектральные линии солнечного излучения и полосы поглощения воды, выделенные на кадре гиперспектретра (сплошная облачность, спектр красного цвета на рисунке слева внизу). В качестве примера наиболее яркие полосы идентифицированы (стрелки и кодовые обозначения полос внизу рисунка). Нижний рисунок – горизонтальное сечение кадра для угла 7,5 град. Следует отметить, что при вычислении спектрального коэффициента яркости (КЯ) водной толщи [1] происходит нормировка яркости водной толщи на облученность неба, что должно компенсировать изменения во Фраунгоферовых спектральных линиях и полосе поглощения воды в спектре КЯ.

Методика обработки кадров гиперспектрметра основана на формировании пространственно – временных изображений (ПВИ) водной поверхности в различных участках оптического спектра и переходе к относительным флуктуациям яркости поверхности. Восстановление рельефа уклонов волн проводится при наклонном визировании в приближении линейной зависимости яркости поверхности моря от уклонов волн для ясного неба и неба, полностью покрытого облаками. Как известно, при наклонном визировании основными механизмами образования изображения морской поверхности являются угловая зависимость яркости неба и коэффициента Френеля. Разработана приближенная оценка уклонов волн, учитывающая механизм образования контраста уклонов волн только за счет коэффициента отражения Френеля. Уклоны волн будут выражаться через относительные флуктуации яркости формулой:

$$\eta_1 = S / ((F' / F) \sin \theta), \quad (1)$$

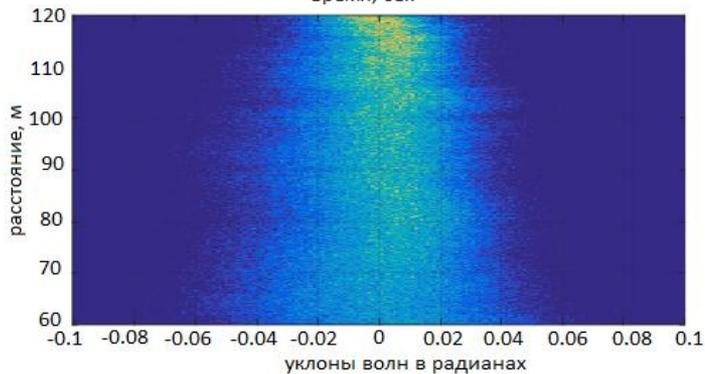
где S – безразмерные относительные флуктуации яркости, η_1 – уклоны в направлении визирования, F – коэффициент Френеля, θ – угол визирования.

Проводится сравнительный анализ характеристик волнения (функции распределения уклонов волн, гистограмм уклонов волн) в различных диапазонах оптического спектра и в различных водных бассейнах (река Волга, Горьковское море, Черное море в районе Кацивели).

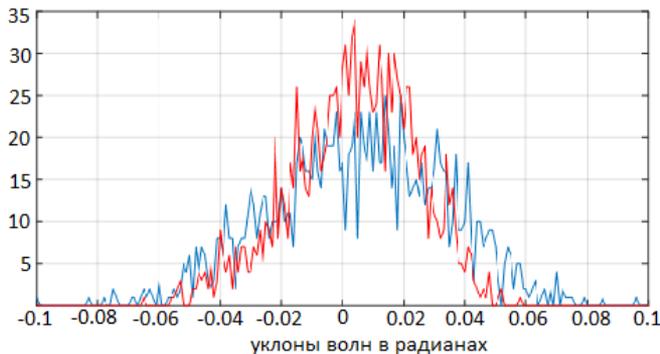


Река Волга

Река Волга, наблюдение с моста, угол визирования 45 град. , высота моста 32 м. Гиперспектрметр, ПВИ уклонов волн, длина волны света 450 нм (без исправления перспективных искажений). Следует отметить, что кроме волн на морской поверхности могут присутствовать «шумы» такие как полосы, обрушения, групповая структура волн, слики, обусловленные загрязнениями на водной поверхности (пленками ПАВ) и т.д. Эти «шумы» можно разделить с помощью спектрального анализа ПВИ при условии, что волны подчиняются дисперсионному соотношению [6]. Контрасты «шумов» растут а контрасты волн падают с уменьшением угла скольжения за счет эффекта затенения волн. Видно, что с расстоянием увеличивается контраст движущихся полос (сликов), обусловленных загрязнениями на поверхности реки.

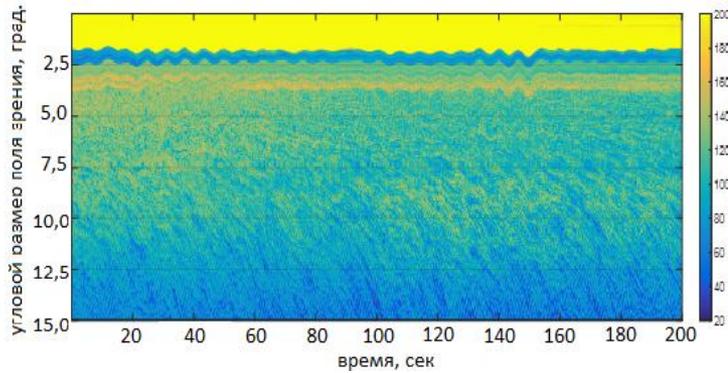


Гистограммы уклонов волн в цветной шкале в зависимости от расстояния от платформы. Гистограммы вычислялись «построчно», то есть по времени. С расстоянием от моста гистограмма «обужается», что связано с увеличением относительного вклада длинных волн и «шумов» из-за расфокусировки изображения коротких волн и затенения.

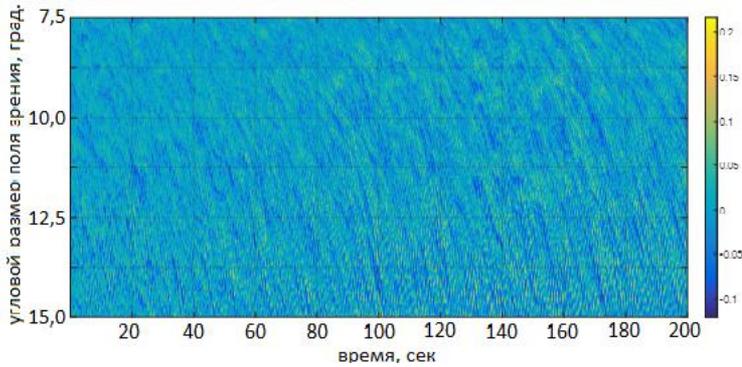


Гистограммы уклонов волн для расстояний от моста 60м (синяя кривая) и 80м (красная кривая). Максимум гистограмм сдвинут от нулевого уклона в сторону положительных уклонов, что может быть связано с течением реки.

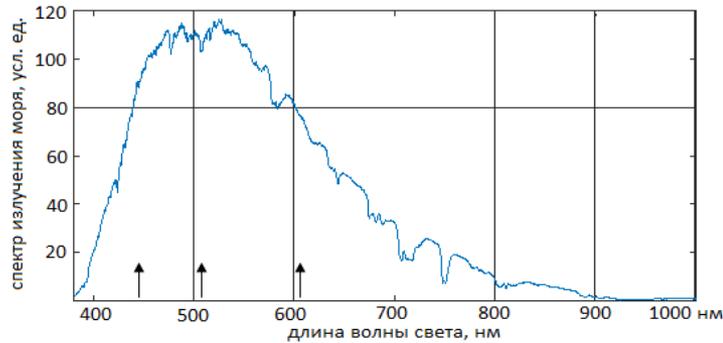
Горьковское море



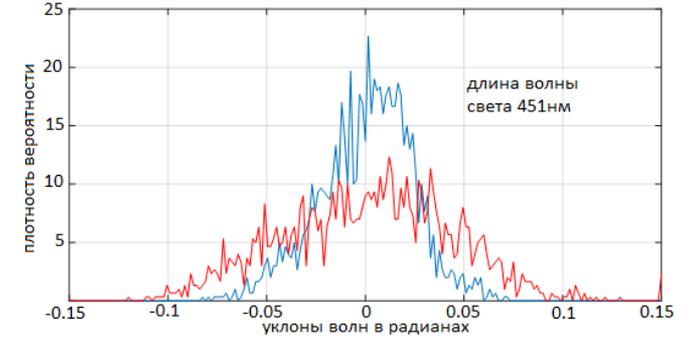
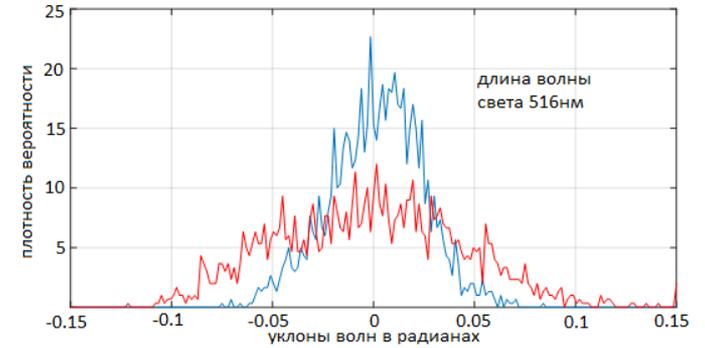
ПВИ морской поверхности на длине волны 516нм. Горьковское море. Корабль, высота гиперспектрометра над морем 3м. Извилистая линия вверху – горизонт, качка.



ПВИ уклонов волн на длине волны 516нм. «Нижняя часть» верхнего рисунка

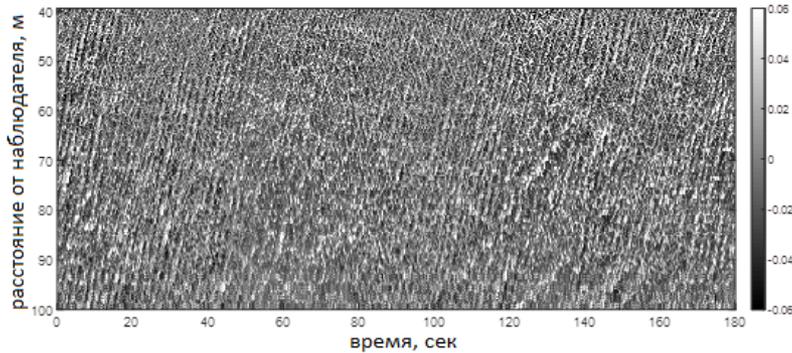


Спектр излучения моря, зарегистрированный гиперспектрометром. Стрелками отмечены спектры на трех длинах волн: 451нм, 516нм и 613нм.

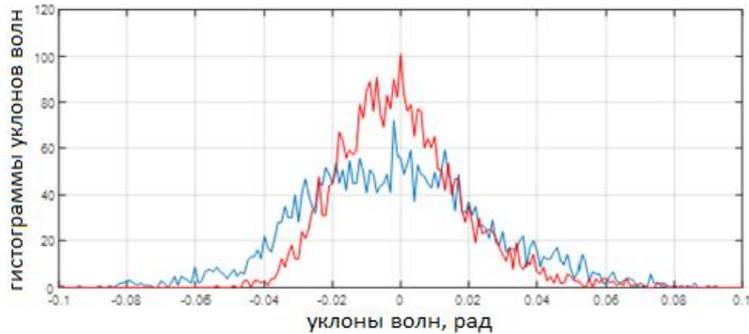


Плотность вероятности уклонов волн для трех длин волн света: 451нм, 516нм и 613нм. Красная кривая - плотность вероятности, вычисленная по ПВИ в точке 15 град., синяя кривая – вычислена по ПВИ в точке 7,5 град., ближе к горизонту. Отметим, что плотности вероятности уклонов волн, вычисленные по ПВИ уклонов для различных длин волн оптического излучения, очень близки, что свидетельствует о применимости модели (1) для восстановления уклонов волн.

Черное море, океанографическая платформа



ПВИ уклонов длинных волн в направлении визирования (наклонные полосы), восстановленное данным методом (по формуле (1)) из изображения поверхности моря при наблюдении под скользящими углами. Интенсивность изображения пропорциональна уклонам волн в направлении визирования в радианах (см. врезку справа). По вертикали отложено расстояние от наблюдателя в метрах, по горизонтальной оси – время в секундах. Уклоны длинных волн можно оценить в несколько градусов, что соответствует по порядку величины литературным данным. Измерения проводились в п. Кацивели с океанографической платформы, расположенной в море. ПВИ морской поверхности формировались из оптических «сечений» морской поверхности, регистрируемых с помощью линейки фотоприемников. Высота линейки фотоприемников над уровнем моря составляла 14 м, направление наблюдения – от берега в открытое море. При создании ПВИ уклонов поверхности моря исправлялись проективные искажения изображения моря при наблюдении под скользящими углами [6].



Гистограммы уклонов волн для двух расстояний от платформы в 40 м (синий график) и 100 м (красный график). У гистограммы для большого расстояния от платформы (для малых углов скольжения) уменьшается доля отрицательных уклонов волн, то есть уклонов, обращенных «от наблюдателя» и, соответственно, увеличивается количество малых уклонов волн, что связано с явлением затенения склонов волн при скользящих углах наблюдения.

Проведены исследования статистических характеристик волнения по оригинальной методике работы [6] с помощью сканирующего гиперспектрометра. Проведен сравнительный анализ характеристик волнения (функции распределения и гистограммы уклонов волн) в различных диапазонах оптического спектра и в различных акваториях (Горьковское море, река Волга, Черное море в районе Кацивели). Зарегистрирован эффект сдвига максимума функции распределения склонов, обусловленный течением реки. Выявлены общие особенности характеристик волнения в различных акваториях. Сделан вывод о применимости данной методики для дистанционной диагностики волнения.

Работа выполнена по Госзаданию FFUF-2021-0006 (Разработка радиофизических методов исследования океана и внутренних водоемов).

1. Корчемкина Е.Н., Мольков А.А. Региональный биооптический алгоритм для Горьковского водохранилища: первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 184-192. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192.
2. Большаков А.Н., Бурдюгов В.М., Гродский С.А., Кудрявцев Е.Н. Определение спектра энергонесущих поверхностных волн по изображению солнечного блика // Исследование Земли из космоса. 1988. № 5. С. 11–18.
3. Лупян Е.А. Восстановление углового распределения энергии в двумерном спектре возвышений морской поверхности по ее оптическому изображению // Исследование Земли из космоса. 1988. № 3. С. 31–35.
4. Титов В.И., Артамонов А.Ю., Баханов В.В., Ермаков С.А., Лучинин А.Г., Репина И.А., Сергеевская И.А. Мониторинг состояния поверхности моря по пространственно – временным оптическим изображениям // Исследование земли из космоса. 2014. № 5. С. 3-14. DOI: 10.7868/S0205961414050078.
5. Титов В.И., Баханов В.В., Зуйкова Э.М., Кориненко А.Е. Исследование приповерхностных слоев в прибрежной зоне океанов оптическими методами // Материалы 19-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. 2021. С. 288. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.
6. Титов В.И., Антонов А.А. Восстановление рельефа морской поверхности и спектра волнения по изображению поверхности моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. В печати.