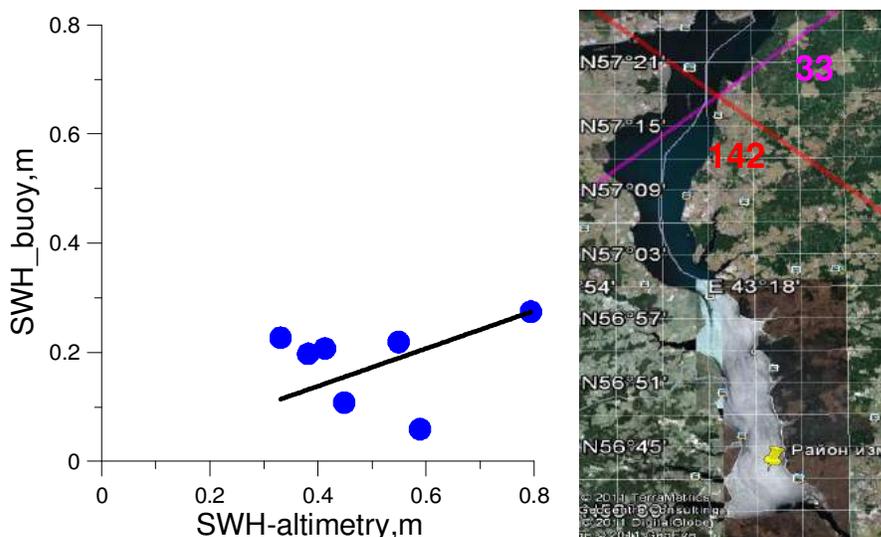


Отчет по гранту РФФИ 17-05-41117 РГО_а «Оценка современного гидрологического состояния крупных озер и водохранилищ Восточно-Европейской равнины на основе численного моделирования и новых алгоритмов обработки данных спутникового микроволнового зондирования» в научно-популярной форме с иллюстрациями .

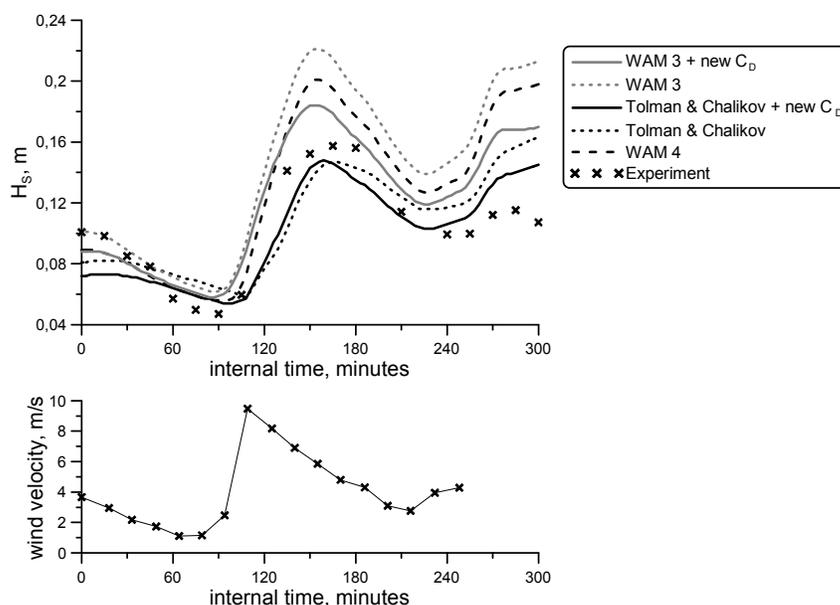
В соответствии с пунктами плана работ на 2017 г. и объявленными целями и задачами были получены следующие основные результаты:

1) Были оценены возможности восстановления высоты волн и скорости приводного ветра на данным альтиметров на спутниках Jason-2, 3. Метод спутниковой альтиметрии позволяет производить измерения значимых высот поверхностного волнения по параметрам телеметрических импульсов, рассеянных поверхностью воды. При этом используется априорная информация о форме среднего принимаемого сигнала полученная в рамках предположений о статистической однородности поверхностного волнения и гауссовом распределении вероятности высот волн. Для проверки возможности восстановления значимых высот волн на акватории водоема среднего размера на примере Горьковского водохранилища было проведено сравнение данных натурных измерений поверхностного волнения с использованием автономной буйковой станции на базе вехи Фруда, проводимых одновременно с пролетом спутников Jason-1 (33 трек) и Jason-2 (142 трек), и высот волн, восстановленных с применением алгоритма адаптивного ретрекинга (см. Троицкая и др. Водные ресурсы, 2012). Было показано, что для условий внутреннего водоема средних размеров спутниковая альтиметрия завышает значимые высоты волн. Причины этого связаны с негауссовой статистикой волнения, обусловленной сильной нелинейностью волнения, типичной для внутреннего водоема, и ошибками в определении формы принимаемых телеметрических импульсов, искаженной из-за отражений от суши. Оценки показывают, что восстановление значимых высот волн возможно, если данные спутниковой радиоальтиметрии получены на расстоянии не менее 5 км от берега при высотах волн не менее 25 см. Такие условия реализуются на крупных внутренних водоемах ЕТР (например, озера Ладожское и Онежское, водохранилища Рыбинское и Цимлянское). В этих же условиях возможно восстановление скорости приводного ветра по данным спутниковой альтиметрии.



Сравнение данных натурных измерений поверхностного волнения с использованием автономной буйковой станции на базе вехи Фруда, проводимых одновременно с пролетом спутников Jason-1 (33 трек) и Jason-2 (142 трек), и высот волн, восстановленных с применением алгоритма адаптивного ретрекинга. Положение треков на карте.

2) Глобальная модель расчета параметров волнения на свободной поверхности WAVEWATCH III была успешно адаптирована к условиям внутренних водоемов средних размеров на примере Горьковского водохранилища. Адаптация включала в себя несколько этапов. В первую очередь, для задания геометрии водоема были использованы спутниковые топографические данные «GLOBE», обладающие максимальным доступным в настоящее время разрешением. В программном коде было изменено значение минимально возможной высоты значимых волн (SWH). Диапазон характерных частот волнения был изменен (сужен) в соответствии с наблюдаемым в натуральных условиях: от 0,2 Гц до 4 Гц, который при моделировании дробился на 31 частоту; было рассмотрено 31 угловое направление. Наиболее важным моментом адаптации явилась модификация функции ветровой накачки источника (подстройка ветровой накачки) на основе зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления (обмена импульсом) от скорости ветра, полученной по данным натуральных экспериментов на полигоне Горьковского водохранилища. В результате была предложена модифицированная модель ветровой накачки WAM3-mod. С использованием этой модели по данным о скорости и направлении ветра, разнице температур вода-воздух моделировалось волнение в водохранилище при заданном Гауссовом начальном возмущении. Были выполнены расчеты в широком диапазоне метеорологических и сезонных условий. Использование новой балк-формулы коэффициента сопротивления для ветровой накачки позволило существенно (более 15 %) улучшить точность прогноза SWH в рамках существующих параметризаций ST1 (WAM3), ST4.



Сверху: расчет значительной высоты волнения при помощи модели WW3 при подключении различных параметризаций. Снизу: скорость ветра на стандартной метеорологической высоте 10 м, измеренная в натурном эксперименте и задаваемая на вход модели WW3

3) Короткие разгоны ветра в условиях внутренних водоемов и нелинейность волн по данным натуральных наблюдений обусловили необходимость подстройки схемы нелинейности в модели WAVEWATCH III. Была произведена оценка чувствительности модели к различным комбинациям коэффициентов (λ_{nl} , C), входящих в схему нелинейности Discrete Interaction Approximation (DIA) и отвечающих за отклонение по частоте и за интенсивность взаимодействия соответственно. Для поиска комбинации оптимальных параметров схемы нелинейности, была произведена оптимизация по критерию наименьшего относительного среднеквадратичного отклонения расчетов в рамках модели от данных натуральных измерений значимой высоты волн и частоты пика в

спектре волнения. В результате была подобрана комбинация оптимальных параметров DIA λ_{nl} и C для модели WAM3-mod: $(\lambda_{nl}, C) = (0.42, 8.2 \cdot 10^6)$ вместо стандартных $(0.25, 3 \cdot 10^7)$. В области пересечения двух областей минимальных значений отклонений расчета от эксперимента выбрана точка, отвечающая "оптимальному" набору параметров.

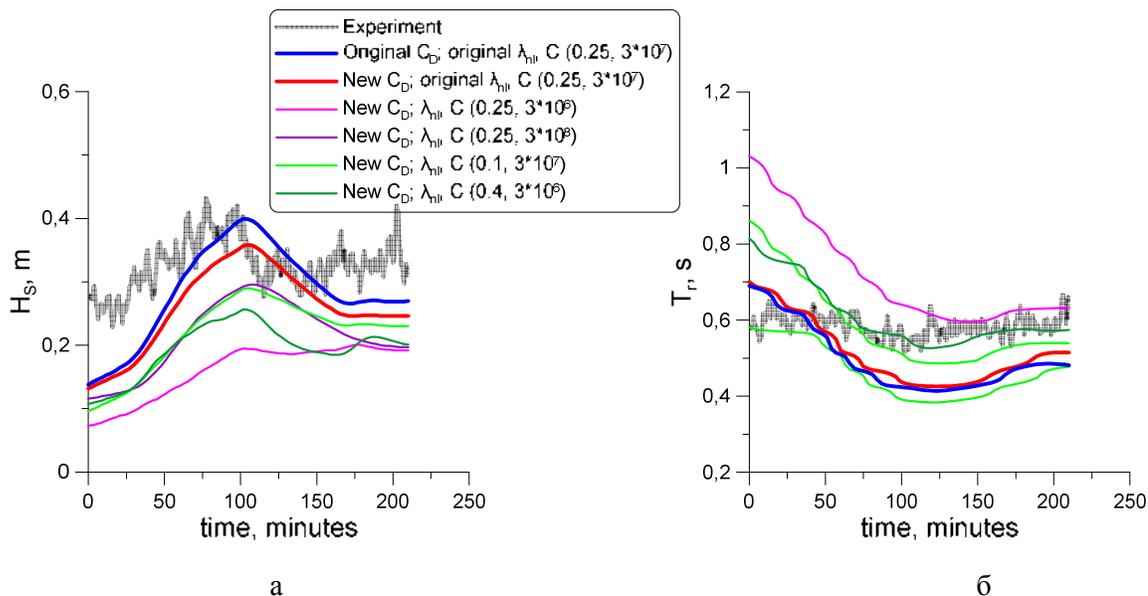


Иллюстрация чувствительности модели WW3 к изменению параметров схемы нелинейности DIA: а) влияние на расчет значительных высот волнения, б) влияние на расчет средних периодов волнения.

4) Выполнена модификация модели подстилающей поверхности в мезомасштабной модели атмосферной циркуляции WRF-ARW под локальные условия Горьковского водохранилища. Были использованы специальные географические данные «modis_lakes» для четырех вложенных доменов с минимальным размером ячейки четвертого домена 1 км. Осуществлено извлечение данных GMTED2010 формата GEOTIFF с разрешением до 250 м для использования в пятом вложенном домене. Освоенная методика позволит в дальнейшем в значительной мере улучшить разрешение при расчете характеристик приповерхностного слоя атмосферы над внутренними водоемами и характеристик волнения

5) При разработке новых методик определения времени установления ледового покрова на водоемах и времени начала ледохода по данным дистанционного зондирования в нашем исследовании был использован метод совместного анализа данных спутниковой альтиметрии и СВЧ радиометра, которые зачастую находятся в открытом доступе. Преимуществом здесь является то, что оба сенсора (альтиметр и радиометр) расположены на борту одного ИСЗ, и измерения проводятся одновременно. Кроме того, измерения с помощью радиоальтиметра проводятся в точке надира (это обусловлено геометрией метода спутниковой альтиметрии), а измерения радиометра проводятся также в точке надира или близкой к ней.

Ранее для идентификации ледового покрова на внутренних морях, озерах и водохранилищах использовался анализ повторяемости соотношений коэффициента обратного рассеяния и нормированной радиояркостной температуры подстилающей поверхности, рассчитанной по каналам 23,8 и 36,5 ГГц для спутников ERS-1, ERS-2 и ENVISAT и каналам 18,7 и 34 ГГц для спутников Jason-1 и Jason-2. Этот метод позволяет определить временной интервал появления ледяного покрова на подстилающей поверхности по границе между областями скопления точек на диаграммах рассеяния, построенных для каждого спутника.

Такой подход не является унифицированным, так как у СВЧ радиометров спутников ERS-1, ERS-2 и ENVISAT отсутствует канал 18,7 ГГц, а канал 23,8 ГГц используется для оценки влажности воздуха, так как лежит близко к полосе поглощения водяного пара 22 ГГц. Поэтому в настоящем проекте был разработан модифицированный метод. В качестве экспериментального полигона для разработки новой методики идентификации наличия ледового покрова на средних водоемах было выбрано Рыбинское водохранилище.

Для отработки новой методики были выбраны данные спутника Jason-1, как наиболее длинный ряд измерений, имеющие период повторения около 10 суток, и из-за оптимального расположения треков и на акватории водохранилища. Треки 066 и 059 пересекают главный плес (рис. 1), составляющий основную часть водоема и имеющий озерный тип гидрологического режима. Данные спутников ERS-1, ERS-2 и ENVISAT на настоящем этапе не использовались по следующей причине. При обработке данных этих спутников необходимо учитывать, что каналы 23,8 и 36,5 ГГц отклонены от надира $+2,5^\circ$ и $-1,5^\circ$ соответственно. Таким образом, данные радиояркостной температуры первого канала отстоят от точки надира на 30,8 км, а второго – на 20,3 км. Чтобы совместить их с точкой надира необходимо брать измерения радиояркостной температуры по каналу 23,8 ГГц на 5 измерений до, а по каналу 36,4 ГГц на 4 после времени измерения альтиметра.

Для разработки новой методики были проанализированы несколько комбинаций радиояркостных температур (23,8 и 34,0 ГГц, 18,7 и 23,8 ГГц, 7 и 34,0 ГГц) и коэффициентов обратного рассеивания в C и Ku диапазонах. Выделение трехмерных областей плотных скоплений проводилось на основе дискретного математического анализа. Анализ полученных результатов показывает, что совместный анализ трехмерного распределения радиояркостных температур по всем каналам и коэффициента обратного рассеивания позволяет получить лучшие результаты по сравнению с используемой ранее методикой совместного анализа нормированной температуры по каналам 18,7 и 34 ГГц и коэффициента обратного рассеивания в Ku диапазоне.

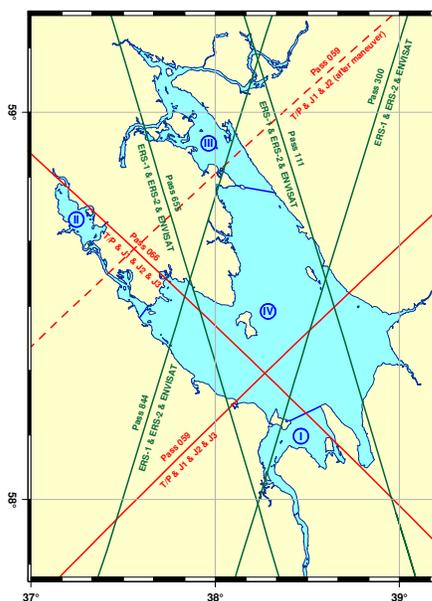
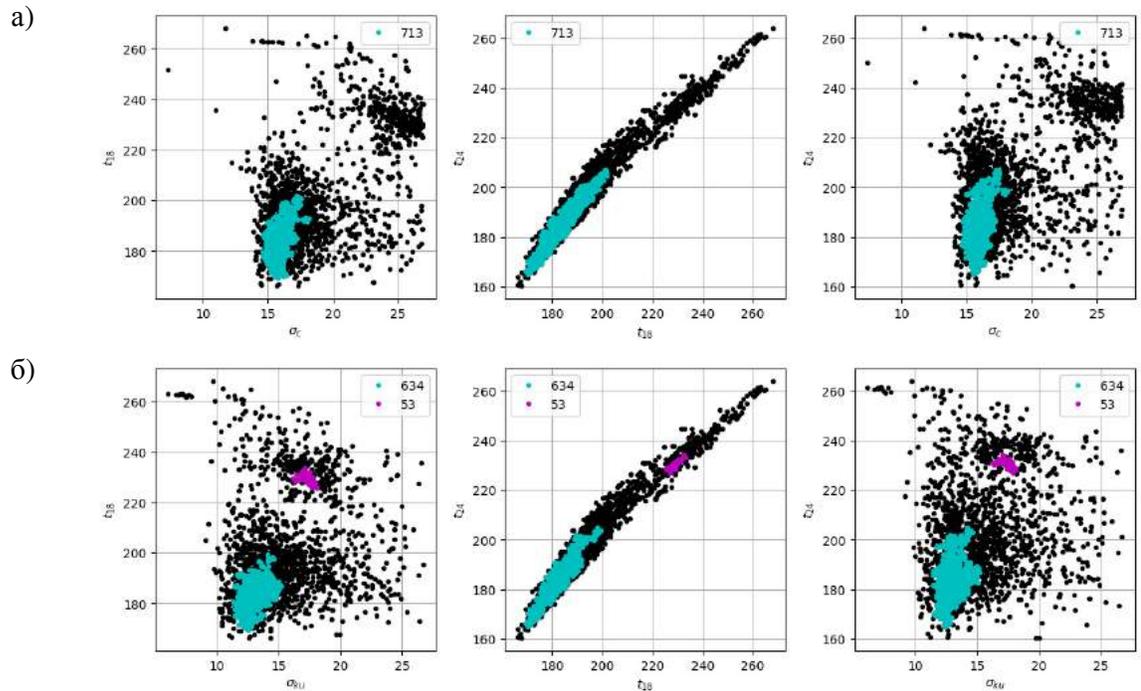
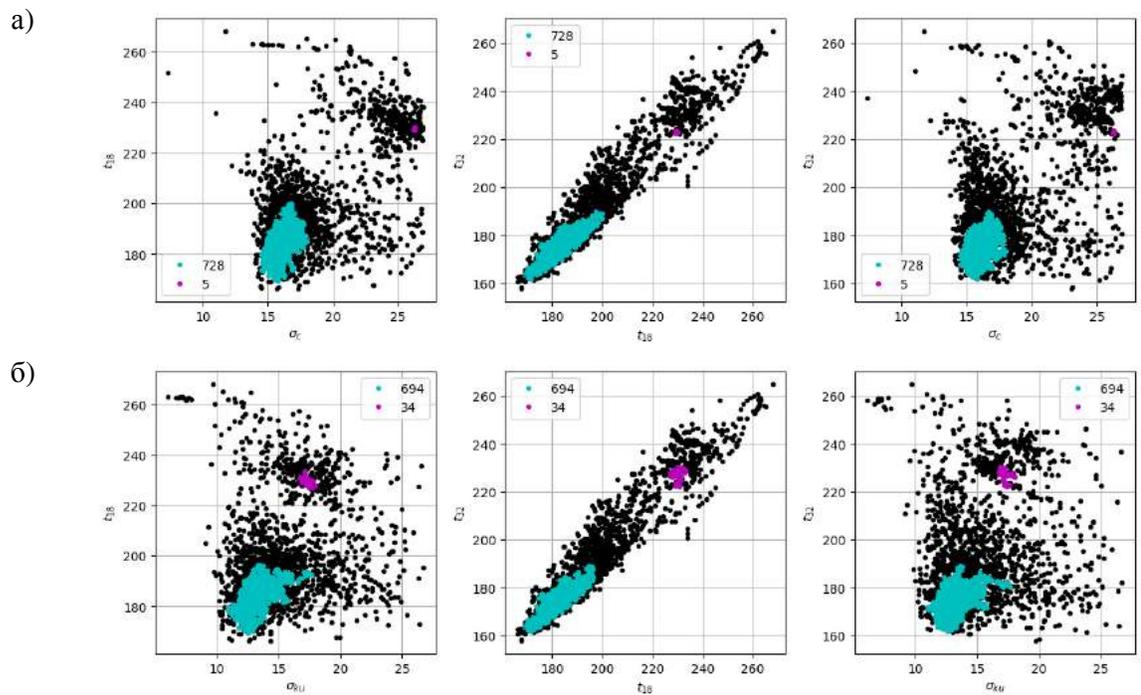


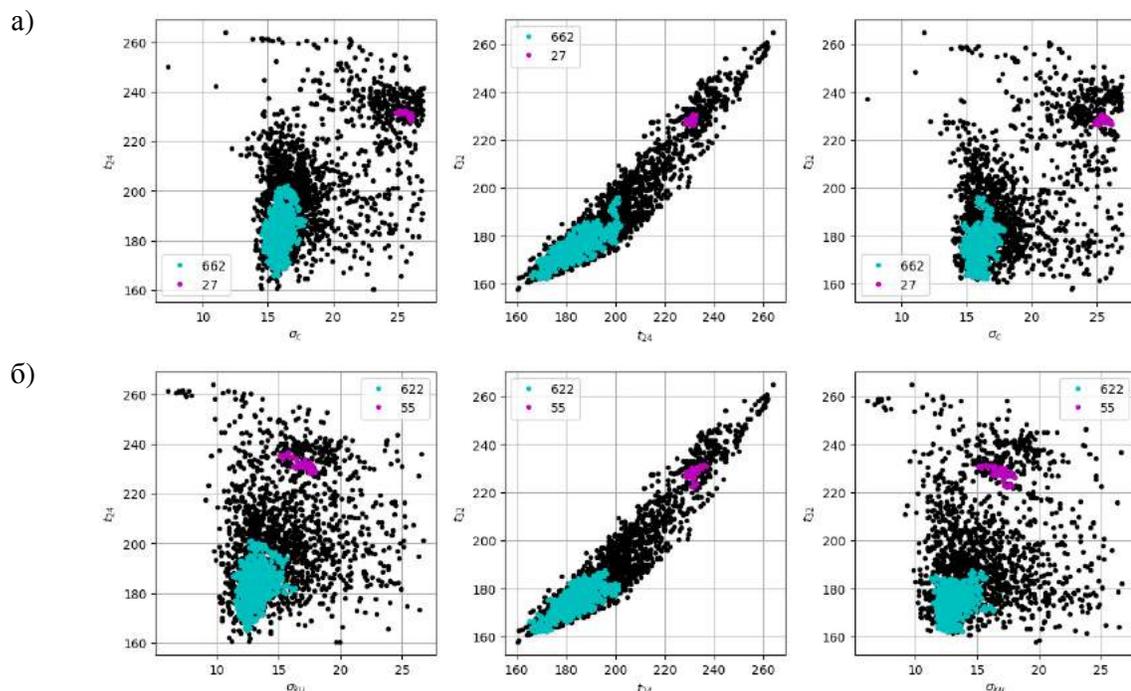
Схема Рыбинского водохранилища: I – волжский плес, II – моложский плес, III – шекснинский плес, IV – главный плес.. Положение треков спутников ТОРЕХ/Poseidon (Т/Р), Jason-1 (J1), Jason-2 (J2) и Jason-3 (J3) показаны красной сплошной линией и штриховой линией после совершения маневров спутниками Т/Р, J1 и J2. Положение треков спутников ERS-1, ERS-2 и ENVISAT показано зеленой сплошной линией.



Проекции трехмерного распределения радиоярких температур по каналам 18,7 и 23,8 ГГц и коэффициентов обратного рассеивания в С диапазоне (а) и в Ку диапазоне (б) по данным спутника Jason-1 для акватории Рыбинского водохранилища. Плотные скопления, выделенные по ДМА, для воды и льда выделены соответственно голубым и пурпурным.



Проекции трехмерного распределения радиоярких температур по каналам 18,7 и 34,0 ГГц и коэффициентов обратного рассеивания в С диапазоне (а) и в Ку диапазоне (б) по данным спутника Jason-1 для акватории Рыбинского водохранилища. Плотные скопления, выделенные по ДМА, для воды и льда выделены соответственно голубым и пурпурным.



Проекции трехмерного распределения радиоярких температур по каналам 23,8 и 34,0 ГГц и коэффициентов обратного рассеивания в *C* диапазоне (а) и в *Ku* диапазоне (б) по данным спутника Jason-1 для акватории Рыбинского водохранилища. Плотные скопления, выделенные по ДМА, для воды и льда выделены соответственно голубым и пурпурным.

б) Для верификации новых методик определения установления ледового покрова и освобождение ото льда создан архив по данным натурных измерений для Горьковского водохранилища (гидропосты Сокольское и Юрьевец за период 2002–2016), Рыбинского и других водохранилищ волжского каскада. Для более точного определения параметров ледовой обстановки создана база данных спутниковых изображений внутренних водоемов для возможности оценки ледовой обстановки. Большую часть базы данных составляют изображения, полученные в видимом оптическом диапазоне спутниками Landsat 7,8 и спутниками Aqua и Terra для Рыбинского за и Горьковского водохранилищ в период 1999–2017 при условиях различной облачности. При облачности менее 10% можно выполнить точную оценку площади ледового покрытия водоемов. Учитывая проблемы анализа изображений в оптическом диапазоне, связанные с влиянием облачности, дополнительно собираются имеющиеся в распоряжении изображения поверхности (содержащие выбранные для изучения водные объекты) полученные в микроволновом диапазоне радиолокаторами синтезированной апертуры (РСА). Т.к. облачность прозрачна для микроволнового излучения, оно позволяют получить изображения поверхности вне зависимости от погодных условий (облачности). Так создан архив изображений Горьковского, Рыбинского, Куйбышевского водохранилищ, полученных со спутника Sentinel-1A в *C*-диапазоне за период с 2016 г, которые находятся в открытом доступе.



15.11.2015



16.12.2015



28.12.2015



31.12.2015



07.01.2016



26.03.2016



13.04.2016



17.04.2016



24.04.2016

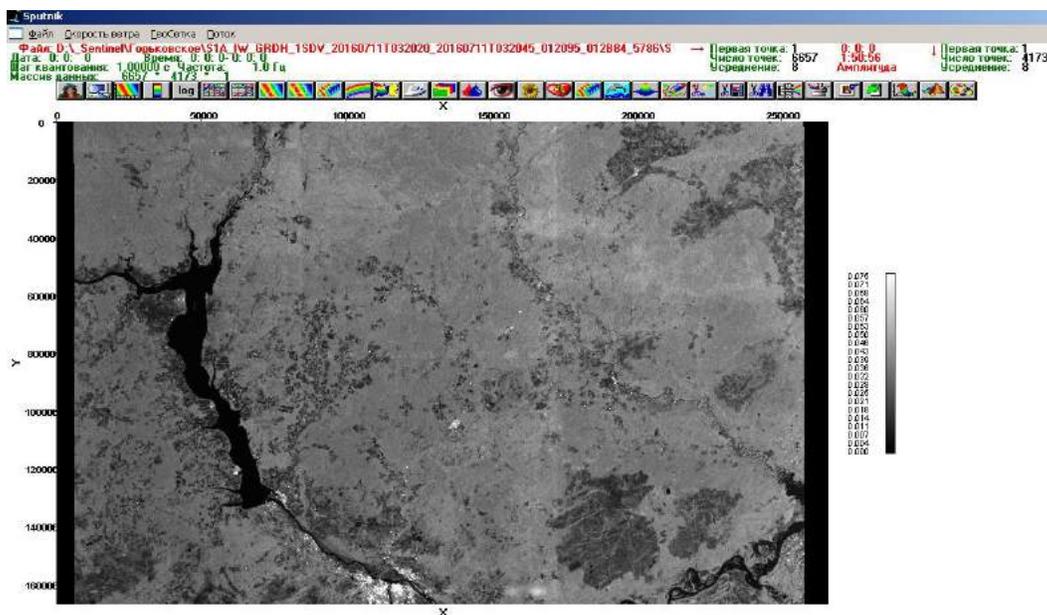


29.04.2016

Спутниковые изображения в видимом диапазоне акватории Рыбинского водохранилища по данным спектрорадиометра MODIS спутников Aqua и Terra для зимы 2015/2016.

7) Разработано специальное программное обеспечение для обработки данных РСА изображений со спутника Sentinel-1A. Это обеспечение реализовано в виде дополнительных модулей программного комплекса "Sputnik", предназначенного для определения характеристик пограничного слоя атмосфера-гидросфера по данным

микроволнового дистанционного зондирования в С и Х - диапазонах с использованием РСА. Имеющиеся в распоряжении инструменты программного комплекса “Sputnik” позволяют восстанавливать по РСА - изображениям значения следующих параметров приводного слоя атмосферы: 1) приводной скорости воздушного потока на высоте 10 м от невозмущенного уровня 2) турбулентного потока импульса в пограничном слое. Программа обеспечивает считывание предварительно откалиброванных файлов представляющих распределение удельной эффективной поверхности рассеяния полученных в различных режимах поляризационных режимов излучения/приема включая перекрестные (НН, VV, VH, HV) и восстановление скоростей приводного ветра и турбулентного потока импульса на основе предложенных авторами геофизических модельных функций. Высокое пространственное разрешение (до 40 м) позволит в дальнейшем обеспечить определения параметров ледового покрытия и контура береговой линии на изображениях внутренних водоемов, для чего будут разработаны специальные инструменты. Инструменты программной оболочки позволяют выполнять различные операции, включая анализ статистических характеристик и спектральную обработку.



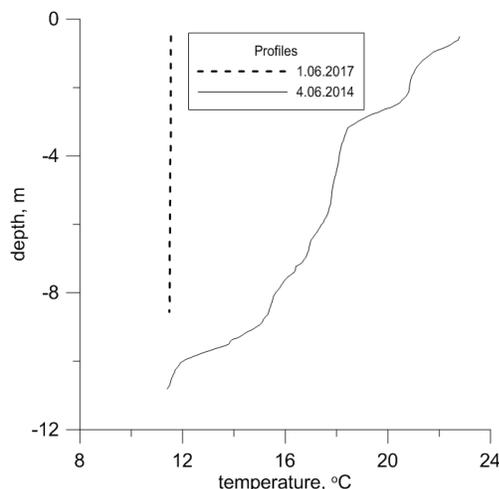
Пример скриншота окна программы спутник с загруженным изображением (УЭПР) снимка со спутника Sentinel - 1A полученного в режиме перекрестной поляризации VH

8) Численная модель формирования температурного расслоения LAKE была успешно адаптирована к условиям Горьковского водохранилища. Новизна, как и в случае с моделью WAVEWATCH III, была связана с модификацией кодов программы для использования новой параметризации ветровой накачки (по данным измерений на Горьковском водохранилище), которая в свою очередь задает в модели параметры турбулентности в приповерхностном слое. Это критически важно для корректного расчета, т.к. в связи с небольшими размерами, водохранилища и внутренние водоемы чувствительны к процессам перемешивания и ветроволнового взаимодействия, поэтому температурный режим отличается сильной изменчивостью, не только сезонной и суточной, но и кратковременной (в пределах 1 часа).

В качестве входных данных используется начальный температурный профиль, метеорологические параметры (температура воздуха, атмосферное давление, удельная влажность воздуха, скорость выпадения осадков, зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, солнечная радиация и встречное длинноволновое излучение) для каждого дня через 6 часов (четыре точки каждого дня расчетного периода), для которого решается задача распределения температуры по глубине. В исходной версии

программного комплекса LAKE начальный температурный профиль (т.н. точка отсчета для задачи прогнозирования) задавался с помощью разности температур между дном и поверхностью и глубиной перемешанного слоя. Т.е. рассматривались 3 точки: значение на поверхности, на нижней границе перемешанного слоя и на границе вода-грунт. В модифицированной версии начальный профиль задается произвольно – он считывается из файла, содержащего значения температуры на различной глубине. Это позволяет более полно воспроизводить температурную стратификацию термоклинного типа, характерную для равнинных гидрологических объектов среднего размера. Метеорологические параметры были получены комбинированным способом: часть данных была взята из архивов ближайших метеостанций, другая часть – из данных реанализа NCEP/NCAR. Были сформированы данные начиная с сезона 2014 г, т.к именно тогда стали выполняться регулярные измерения характеристик вертикального распределения температуры, которые теперь можно использовать для верификации численных расчетов. Для расчетов коэффициента экстинкции (поглощения падающего солнечного излучения) использовались натурные данные измерений характеристик прозрачности воды с использованием диска Секки. Таким, образом модель успешно адаптирована, и подготовлены все данные для выполнения расчетов температурных режимов и комплексной верификации для условий Горьковского водохранилища в период 2014-2017 г.г.

9) В осенне-летнем сезоне 2017 г. были продолжены многолетние измерения характеристик метеорологической и гидрологической обстановки на полигоне Горьковского водохранилища с использованием многофункционального измерительного комплекса на базе модернизированной станции веха Фруда и дополнительных средств. Измерялись параметры воздушного потока, волнения, профиля температуры, определялись биомасса и видовой состав фитопланктона. Для исследования последних использовались методика экспресс диагностики, пробы брались всегда с нескольких глубин. Полученные данные в ходе настоящего сезона оказались уникальными в силу общей погодной аномалии сложившейся на европейской части России в начале и середине лета 2017 г. С одной стороны сезон характеризовался более сильными ветрами над водохранилищем, что позволило уточнить балк формулу для коэффициента аэродинамического сопротивления в области сильных ветров. С другой стороны, в июне и июле наблюдались аномально низкие температуры воздуха, и была сильная облачность. В сочетании с сильным перемешиванием приповерхностного слоя за счет ветро-волнового взаимодействия это привело практически к постоянному однородному распределению температуры на протяжении всего сезона и аномально низкой численности и биомассы фитопланктона.



Сравнение профилей температуры измеренных СТД зондом в начале июня для 2014 и 2017 г.г.

Эти результаты сильно отличаются от предыдущих сезонов, когда наблюдалось сильное температурное расслоение (стратификация) и более сильное цветение водоема. Таким образом, полученные на данном этапе проекта в ходе натуральных измерений данные существенно расширяют диапазон условий, при которых будут верифицироваться численные модели и в первую очередь модель LAKE (см. выше).

Наиболее важной особенностью прошедшего сезона измерений стало проведение тестовых измерений процессов трансформации воздушных потоков при переходе через береговую линию. В эксперименте выполнялись одновременные измерения параметров воздушного потока как на суше вблизи береговой линии, так и на акватории водохранилища. На акватории водохранилища измерения проводились с использованием автономной буйковой станции на базе океанографической вежи Фруда, оснащенной линейкой акустических датчиков скорости ветра (высоты размещения 0.1, 0.75, 1.25, 2.3 и 5.3 м от поверхности воды). На берегу (западный берег Горьковского водохранилища около деревни Колганово, 56°40' с.ш. и 43°14' в.д.) скорость ветра измерялась на краю поля скошенного поля, также с использованием акустических датчиков, размещенных на рядом расположенных мачтах (высоты измерения 1.2 и 3.3 м от земли). Расстояние вдоль направления ветра от препятствий высотой более 0.3 метра – 1 км, расстояние от препятствий высотой более 2 м – около 2 км. Расстояние до уреза воды не превышала 100 м. Погодные условия были подобраны таким образом, чтобы ветер имел направление близкое к траверзу с точки береговых измерений на вежу Фруда. Угол составлял примерно 20 градусов. Измерения проводились в течение 2 часов. Скорость ветра на акватории 7-12 м/с, скорость ветра на берегу 3-6 м/с.

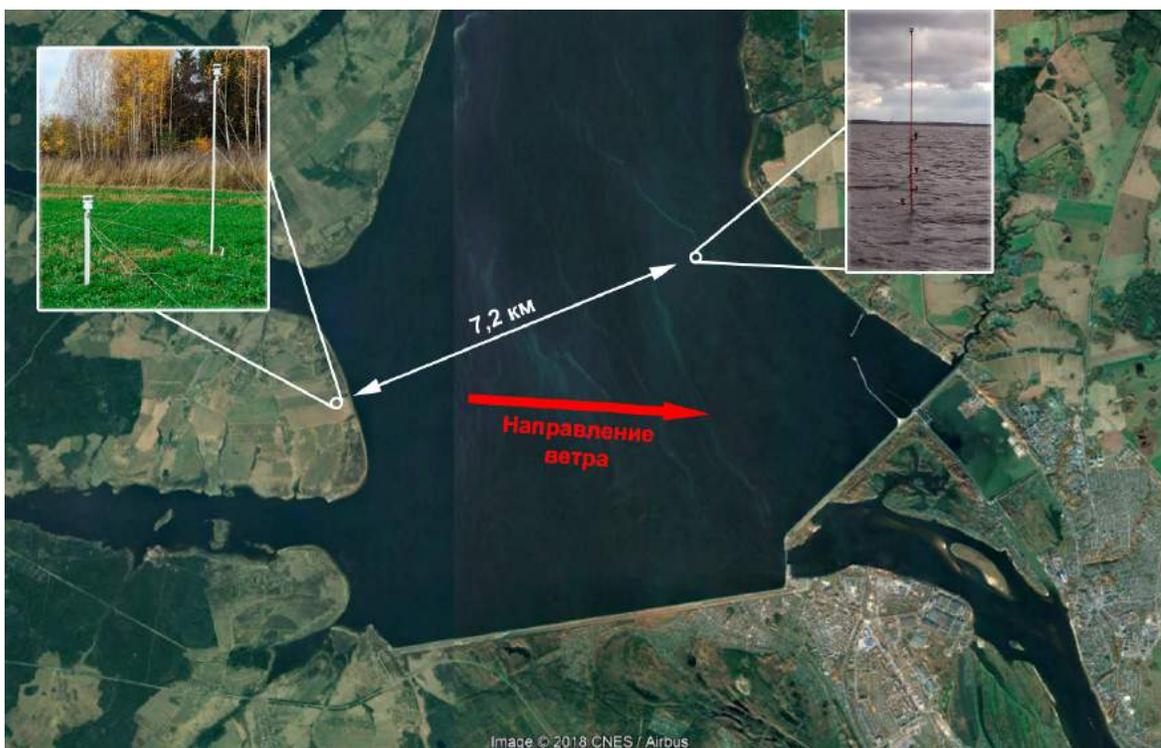


Иллюстрация проведения экспериментов по трансформации исследованию воздушных потоков при переходе с суши на водную поверхность.

10) В ходе экспедиционных исследований выполнялись заборы проб с помощью батометра ГР -18 с различных глубин. Разработанная методика экспресс-анализа видового состава планктона и оценки его биомассы базируется на подсчете количества водорослей на единицу объема и определения их характерных размеров, являющихся основой для

определения их биомассы и пересчета других количественных характеристик на клетку водоросли или единицу биомассы. Численность водорослей выражается количеством клеток в единице объема. Для оценки численности фитопланктона применялся метод подсчета клеток под микроскопом. Для подсчета клеток в исследовании применялась камера Горяева. Используется метод оценки биомассы микроводорослей по клеточному объему (биообъему). Объем вычисляется по линейным размерам клеток, измеряемым под микроскопом. Измеренные линейные размеры клетки подставляют в соответствующую геометрическую формулу, определяют объем и рассчитывают биомассу клетки. Анализ проб проводился при помощи цифрового микроскопа Levenhuk, в программе распознавания изображений Levenhuk TourView. Исследования могут выполняться непосредственно на судне после забора проб воды. В условиях низкой биопродуктивности, для увеличения точности исследований пробы концентрируют предварительным отстаиванием (увеличивает время выполнения измерений).

В ходе экспедиционных работ произведен качественный и количественный анализ фитопланктона. Представители диатомовых водорослей (*Asterionella Formosa*, *Cerantium Hirundinella*) обнаружены во всей толще, но в основном концентрируются на большой глубине. Цианобактерии (синезеленые водоросли *Zignema*, *Microcistis aeroginoza*) обнаружены в основном в приповерхностном слое. Показано, что температурное расслоение приводит к росту концентрации синезеленых водорослей и, наоборот, сильное перемешивание дает возможность диатомовым конкурировать с ними. Проведен количественный анализ отобранных проб в зависимости от глубины, температуры и прозрачности, измеренной с помощью диска Секки.

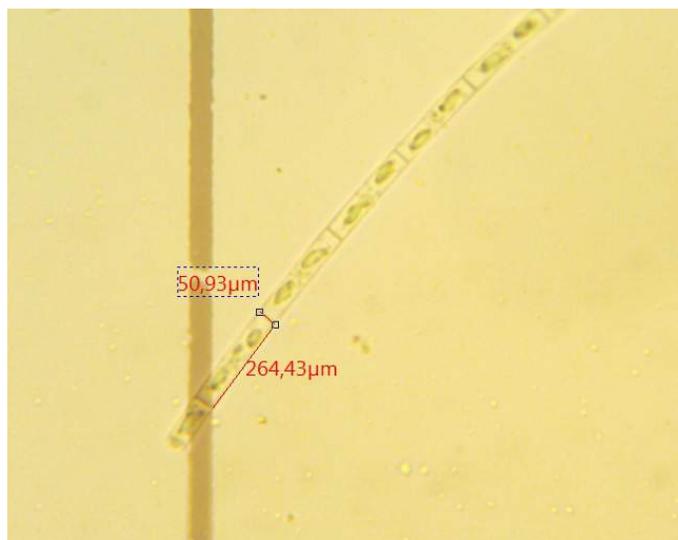
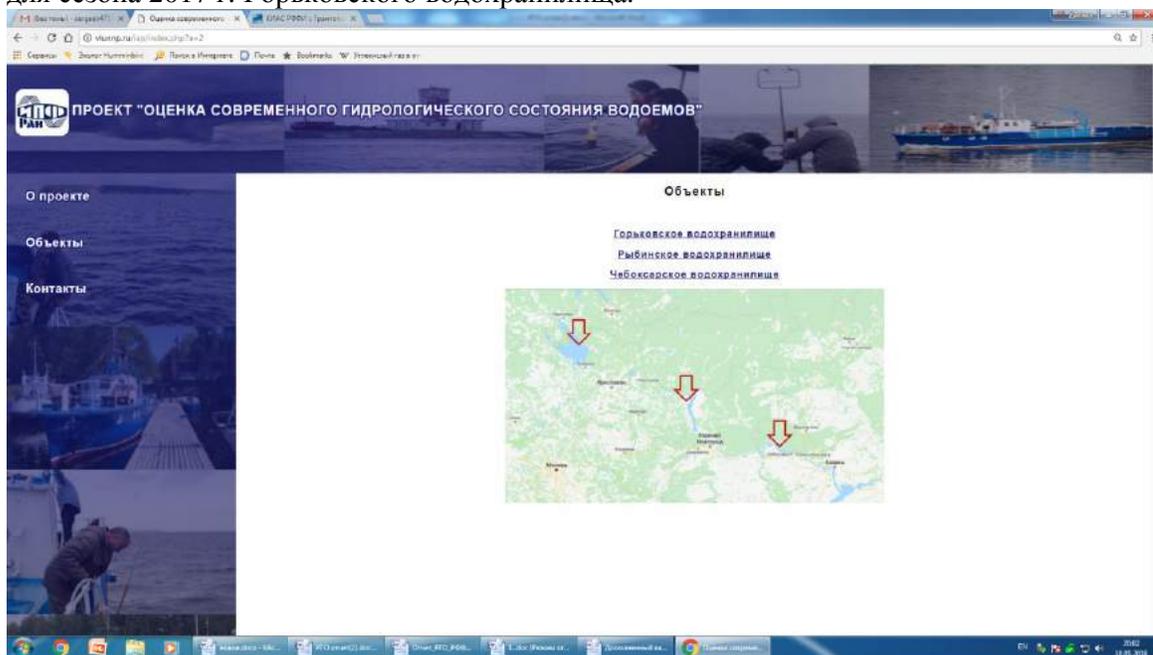


Иллюстрация измерений размеров клетки в программе Levenhuk TourView

11) Начато формирование многослойной базы данных, содержащей данные спутниковых и сопутствующих наземных измерений о гидрологическом состоянии выбранных водных объектов (крупных озер и водохранилищ) Восточно-Европейской равнины. При этом наряду с этими разделами добавлена информация по численным расчетам. Данные натурных измерений подразделяются на: 1) данные об измерении характеристик придонного слоя атмосферы, 2) поверхностного волнения 3) гидрологии (распределения температуры, уровня воды) 4) биопродуктивности (качественный и количественный состав биопланктона). Данные дистанционного зондирования подразделяются на: 1) данные альтиметров 2) данные оптических изображений поверхности 3) данные изображений в микроволновом диапазоне полученные с помощью РСА. Результаты численных расчетов для температурных режимов (LAKE) и ветро-волновой обстановке

(WAVEWATCHIII). Особое внимание, как уже говорилось, уделяется сбору данных о состоянии ледового покрова водных объектов для возможности верификации и валидации разрабатываемых в рамках проекта новых методиках его дистанционной диагностики (см. выше). Для этого, наряду с архивом данных дистанционного зондирования полученных в видимом оптическом диапазоне (спутники Landsat 7, 8 Aqua и Terra) дополнительно собираются имеющиеся в распоряжении изображения поверхности (содержащие выбранные для изучения водные объекты) полученные в микроволновом диапазоне радиолокаторами синтезированной апертуры (РСА). Т.к. облачность прозрачна для микроволнового излучения, оно позволяют получить изображения поверхности вне зависимости от погодных условий (облачности). Так создан архив изображений Горьковского, Рыбинского, Куйбышевского водохранилищ, полученных со спутника Sentinel 1A в С-диапазоне за период с 2016 г, которые находятся в открытом доступе. Опережая план выполнения проекта, была запущена тестовая версия электронного ресурса, обеспечивающего прямой доступ и являющегося пользовательской оболочкой для создаваемой базы данных (<http://vlunnp.ru/iap/>). На нем пока представлена информация для сезона 2017 г. Горьковского водохранилища.



Пример скриншота тестовой версии сайта «ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМОВ» на основе которого будет создан геоportal (<http://vlunnp.ru/iap/>).