

## ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ ВОДЫ В ГОРЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

© 2011 г. Ю. И. Троицкая<sup>1</sup>, Г. Н. Баландина<sup>1</sup>, Г. В. Рыбушкина<sup>1</sup>, И. А. Соустова<sup>1\*</sup>,  
А. Г. Костяной<sup>2</sup>, С. А. Лебедев<sup>3</sup>, А. А. Паниютин<sup>4</sup>, Л. В. Филина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

<sup>2</sup>Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва

<sup>3</sup>Учреждение Российской академии наук Геофизический центр РАН, Москва

<sup>4</sup>Нижегородский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Н. Новгород

\*E-mail: soustova@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 12.11.2009 г.

Исследуется возможность использования альтиметрических измерений для определения уровня воды в Горьковском водохранилище (р. Волга). Анализ основан на данных спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 (трек 142), находящихся в свободном доступе на сайте [www.podaac.jpl.nasa.gov](http://podaac.jpl.nasa.gov). Для обработки альтиметрических измерений использована методика LEGOS (см. [www.legos.obs-mip.fr](http://www.legos.obs-mip.fr)). Проведено сопоставление результатов обработки данных ДЗ с данными гидропостов Государственной сети наблюдений, которое показало хорошее качественное соответствие сезонной динамики уровня воды в водохранилище. Обсуждаются причины имеющихся расхождений на основе анализа форм радиоимпульсов, отраженных от подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, альтиметрические измерения, уровень воды, формы радиоимпульсов, Горьковское водохранилище

### ВВЕДЕНИЕ

Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дистанционного зондирования (ДЗ) поверхности Земли с борта космического аппарата. Принцип работы альтиметра основан на расчете расстояния от спутника до подстилающей поверхности (вода, суша, лед и т.д.) по разнице времени между моментом посылки зондирующего радиоимпульса и временем его возврата после отражения. Спутниковые альтиметрические измерения регулярно проводятся с середины 1980-х годов (Лебедев, Костяной, 2005). Среди них следует выделить следующие программы: серия российских спутников ГЕОИК (девять спутников), спутники Европейского космического агентства ERS-1, ERS-2, ENVISAT, а также спутники TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason-1 (J1 и Jason-2 (J2), функционирующие в рамках международной программы мониторинга топографии поверхности Мирового океана. Продолжительность цикла изомаршрутной программы спутников ERS-1, ERS-2, ENVISAT составляет 35 сут, а для Т/Р, J1 и J2 – 10 сут. Базы исходных альтиметрических данных Т/Р (продолжительность работы: 1992–2002 гг.), J1 (продолжительность работы: с 2002 г. – по настоящее время) и J2 (с 2008 г. – по настоящее время) находятся в свободном доступе

на сайтах (AVISO/Altimetry data center CNES – <ftp://avisoftp.cnes.fr>) и (PODAAC – <ftp://podaac.jpl.nasa.gov>).

Изначально радиоальтиметры, размещенные на борту спутников, были предназначены для мониторинга высоты поверхности Мирового океана и морей, а также для оценки ряда гидрометеорологических параметров, например, высоты волн и скорости приводного ветра. В последние годы альтиметрические измерения активно используются для мониторинга как поверхности суши (Papa et al., 2003; Legresy et al., 2005), так и ледового и снежного покрова (Remy et al., 1996; Remy et al., 1999), а также мониторинга внутренних водоемов: крупных озер (Kostyanoi et al., 2004; Cretaux et al., 2010), водохранилищ, затопленных территорий и рек (Koblinsky et al., 1993; Alsdorf et al., 2001; Benveniste et al., 2004). Как показали исследования последних лет, спутниковые измерения высоты водной поверхности с точностью до 4.2 см хорошо зарекомендовали себя для изучения временной изменчивости не только для озер (Kostyanoi et al., 2004; Cretaux et al., 2010), но и больших рек Южной Америки (Campos et al., 2001; Birkett et al., 1998; Birkett et al., 2002; Maheu et al., 2003; Frappart et al., 2005), Африки (Лебедев, Костяной, 2005; Birkett et al., 1998; Envisat-ERS Exploita-

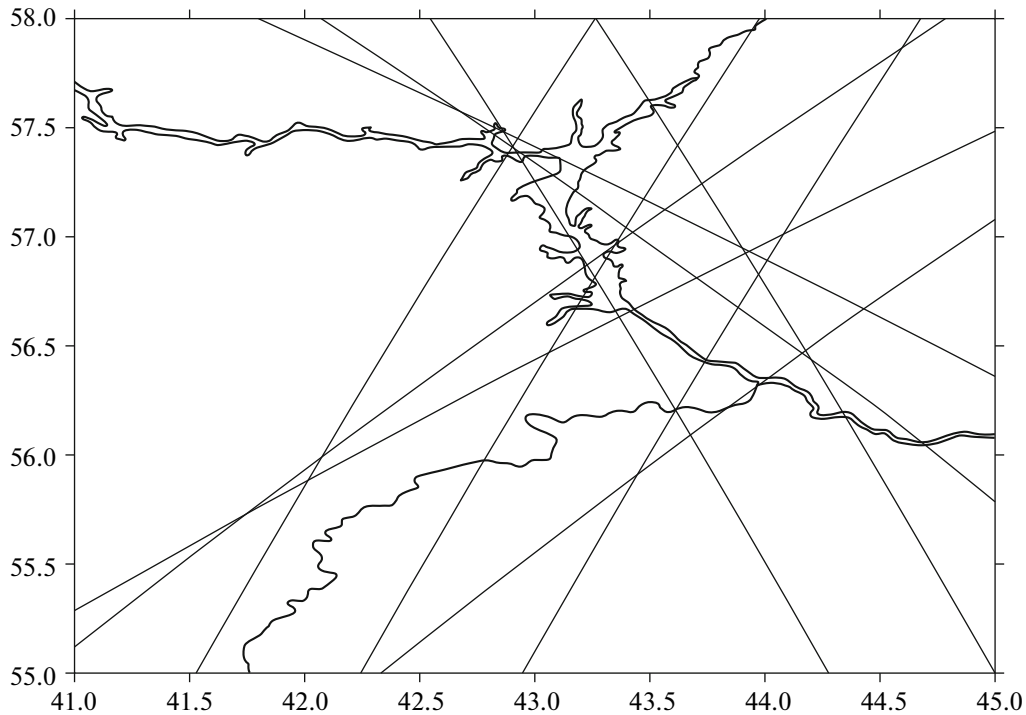


Рис. 1. Положение треков альтиметрических спутников Т/Р, J1 и J2; ERS-1/2 и ENVISAT; GEOSAT и GFO-1 по акватории Горьковского водохранилища.

tion..., 2004) и Азии (Kuraev et al., 2004; Frappart et al., 2006). Последние исследования гидрологического режима в низовьях Волги в период с января 1992 г. по декабрь 2003 г. с использованием спутниковой альтиметрии показали хорошее согласие с данными наблюдений на гидропостах (Лебедев, Костяной, 2005).

Основные преимущества зондирования подстилающей поверхности в микроволновом диапазоне связаны с высокой проникающей способностью радиоволн через атмосферу и облачность, что позволяет проводить исследование в любое время суток, практически в любую погоду и при наличии в воздухе достаточно высоких концентраций аэрозолей. Кроме того, альтиметрические измерения наиболее привлекательны в условиях, когда контактные измерения невозможны по географическим, политическим или экономическим причинам.

В настоящее время в Лаборатории спутниковых геофизических и океанографических исследований (LEGOS – Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, Тулуза, Франция – [http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/General\\_Info.en.html](http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/General_Info.en.html)) и в Министерстве сельского хозяйства США (USDA-FAS – U.S. Department of Agriculture's Foreign Agricultural Service – [http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global\\_reservoir/index.cfm](http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/index.cfm)) реализована программа мониторинга уровня воды в ряде крупных озер и водо-

охранилищ, в том числе на территории РФ (Куйбышевского, Рыбинского, Саратовского, Цимлянского и др., см. (Лебедев, Костяной, 2005)).

Акваторию Горьковского водохранилища пересекают несколько треков спутников Т/Р, J1 и J2 (треки 055 и 142), ERS-1, ERS-2, ENVISAT (треки 397, 500, 855 и 958), GEOSAT и GFO альтиметрических (треки 081 и 474) (рис. 1). Поскольку стандартная обработка альтиметрических измерений, разработанная для условий открытого океана, категорически неприменима в случае внутренних водоемов, то остро встает проблема калибровки и верификации данных дистанционных измерений для них.

Главная цель предлагаемой работы – сравнение временной изменчивости уровня воды в Горьковском водохранилище на р. Волга на основании альтиметрических данных и данных гидропостов, входящих в Государственную сеть наблюдений. Анализ основан на данных альтиметрических измерений вдоль трека 142 спутников Т/Р и J1, поскольку период повторения изомаршрутной программы этих спутников составляет около 10 сут, что по сравнению с изомаршрутными программами других спутников наиболее оптимально для анализа временной изменчивости уровня Горьковского водохранилища.

В статье описана методика, использованная при расчете уровня воды водохранилища по GDR (Geophysical Data Records) данным спутников

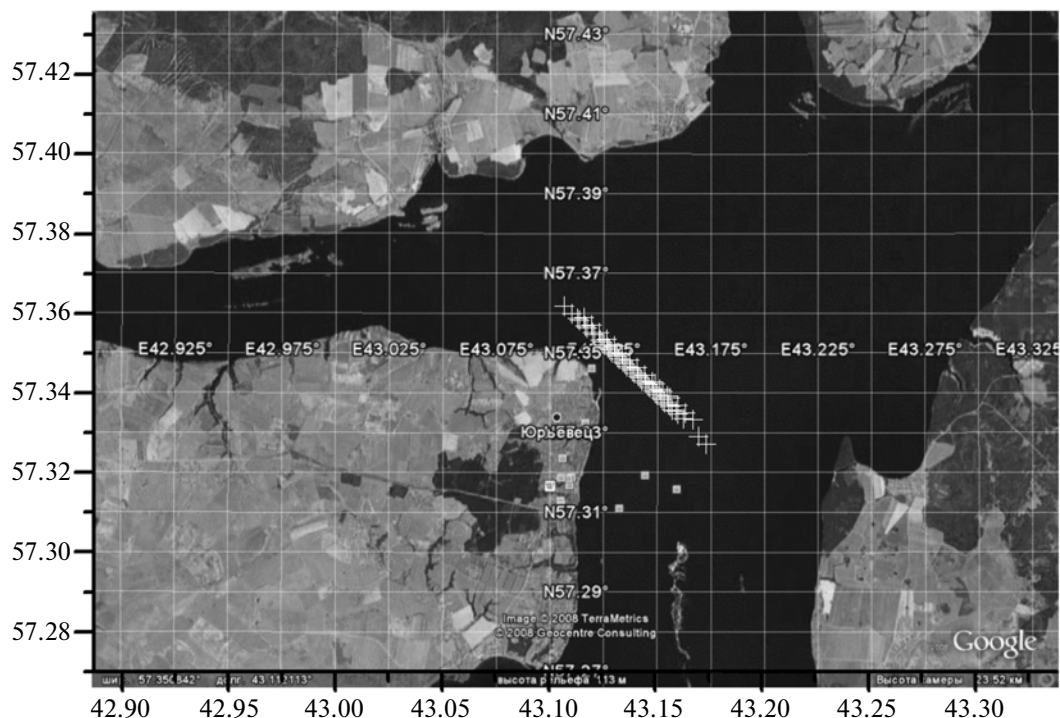


Рис. 2. Расположение точек (крестики) с периодом осреднения 0.05 с для спутника J1 на акватории Горьковского водохранилища (трек 142) летом 2006 г.

Т/Р и J1, а также проведено сопоставление альтиметрических измерений с данными гидропостов Государственной сети наблюдений за уровнем воды в водохранилище. Обсуждаются причины расхождений данных измерений на основе анализа особенностей форм импульсов, отраженных от подстилающей поверхности в районе Горьковского водохранилища. Эти данные взяты из базы данных SGDR (Sensor Geophysical Data Records) спутника J1.

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ И НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для анализа уровня воды нами использованы доступные базы данных (GDR) для 435 циклов спутника Т/Р и 258 циклов спутника J1, в которых представлены альтиметрические измерения со стандартной частотой осреднения (1 Гц) и высокими (10 Гц и 20 Гц соответственно для Т/Р и J1) частотами осреднения. Траектория трека 142 этих спутников пересекает Горьковское водохранилище в его северной части (рис. 1). Длина трека в пределах водохранилища составляет порядка 15 км, координаты точек пересечения трека с берегами водохранилища примерно равны  $43.05^\circ$  в.д. и  $57.4^\circ$  с.ш. — на входе и  $43.23^\circ$  в.д. и  $57.3^\circ$  с.ш. — на выходе. Для выделения временных рядов уровня воды в водо-

охранилище для каждого цикла выбиралось прямоугольное окно, охватывающее область прохождения трека 142 через акваторию водохранилища: долгота изменялась в пределах ( $43.05^\circ$ – $43.23^\circ$  в.д.), а широта — в интервале ( $57.3^\circ$ – $57.4^\circ$  с.ш.). При этом отбирались все альтиметрические измерения, попадающие в данное окно, с периодом осреднения зондирующего импульса 0.1 с для спутника Т/Р, что соответствует пространственному разрешению 580 м и с периодом осреднения 0.05 с для спутника J1, что соответствует пространственному разрешению 290 м. Координаты точек высокого пространственного разрешения вычислялись по формулам

$$lat_i = (latitude + Vlat \times dt_i);$$

$$lon_i = (longitude + Vlon \times dt_i);$$

где *latitude*, *longitude* — координаты (широта и долгота соответственно) точек стандартного разрешения (с периодом осреднения 1 с), присутствующие в базе данных, *dt<sub>i</sub>* — интервал времени между точками стандартного и высокого разрешения, *Vlat* и *Vlon* — проекции скорости движения спутника, вычислявшиеся по имеющимся в базе GDR-данных о координатах точек стандартного разрешения. На рис. 2 показаны точки с периодом осреднения 0.05 с для летних месяцев 2006 г. на акватории Горьковского водохранилища (трек 142 спутника J1). Пространственное разрешение GDR-данных спутника J1 над сушей составляет 6–7 км, поэтому на акватории водохра-

нилища представлено не более одной-двух точек, соответствующих стандартному осреднению 1 с и 20–40 точек, соответствующих высокой частоте 20 Гц. Из рис. 2 видно, что акватория водохранилища содержит достаточное количество точек высокого разрешения.

Корректность данных проверялась согласно документации на базы данных спутников T/P и J1 (AVISO/ Altimetry, 1996; Venada, 1997; Picot et al., 2008). Высота уровня воды в водохранилище относительно геоида рассчитывалась с учетом всех классических поправок:

$$\begin{aligned} \text{Sea Surface Height} = \\ = \text{Altitude} - \text{Orbit} - \text{Corrected Range}, \end{aligned}$$

где *Altitude* – высота орбиты спутника над водной поверхностью, считываемая из базы GDR-данных спутника, *Orbit* – высота орбиты спутника относительно отсчетного эллипсоида, а *Corrected Range* – исправленное с учетом поправок расстояние от спутника до водной поверхности, которое определялось по формуле

$$\begin{aligned} \text{Corrected Range} = \text{wet troposphere correction} + \\ + \text{dry troposphere correction} + \\ + \text{ionosphere correction} + \text{sea state bias}. \end{aligned}$$

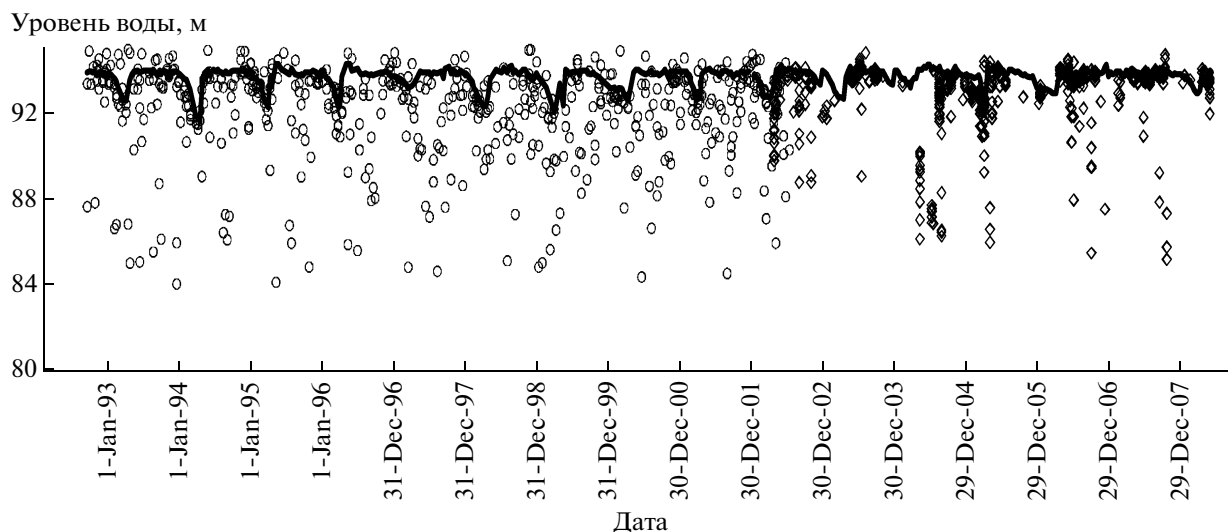
Как видно из данной формулы, при вычислении уровня воды учитывались поправки на влияние атмосферы (*wet troposphere correction* – “влажная” атмосферная поправка и *dry troposphere correction* – “сухая” атмосферная поправка) и ионосферы (*ionosphere correction*), а также на состояние подстилающей поверхности (*sea state bias*). Поправка, учитывающая влияние атмосферы на рассеяние радиоимпульсов молекулами газов, входящих в состав воздуха (“сухая” атмосферная поправка), определялась на основании данных Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF). Поправка на влажность воздуха (“влажная” атмосферная поправка) также определялась по модельным расчетам ECMWF. Заметим, что при определении уровня морей и океанов для вычисления поправки на влажность воздуха обычно используются данные многоканального радиометра, расположенного на борту спутника (Лебедев, Костяной, 2005). В случае внутренних водоемов этот подход не применим из-за большого размера сегмента подстилающей поверхности, с которого излучение принимается радиометром (более 40 км), обычно значительно превосходящего размер водоема. Ионосферная поправка “*ionosphere correction*” определялась по данным системы DORIS, для случая вод суши она учитываться не должна. Использование ионосферной поправки, рассчитанной по данным двухчастотного альтиметра, в

случае внутренних водоемов также затруднено из-за нестандартной формы импульсов, отраженных поверхностью Земли, частично покрытой водой или льдом. Поправка на состояние подстилающей поверхности “*sea state bias*” также определялась на основании модельных расчетов. Все поправки представлены в базах исходных альтиметрических данных. Поправки “обратного барометра”, океанские и полюсные приливы, которые используются при определении уровня океана, для случая вод суши учитываться не должны. На основании сравнения альтиметрических измерений с данными гидропостов данная процедура показала свою высокую эффективность и точность.

По результатам обработки данных с помощью указанной процедуры построены временные зависимости уровней воды в Горьковском водохранилище с разрешением в 10 дн., которое задается продолжительностью цикла изомаршрутной программы спутников T/P и J1 и за период с 1992 по 2007 г. (рис. 3); отметим, что значения ниже 80 м и выше 100 м отбрасывались. Результаты вычислений сравнивались с данными измерений уровней воды на гидропостах Государственной сети наблюдений, определяемых относительно Кронштатского футштока. Рисунок показывает, что данные по изменению уровня воды (относительно некоторого среднего уровня), полученные на основе спутниковой альтиметрии, хорошо отслеживают сезонные изменения уровня воды в водохранилище и находятся в хорошем качественном согласии с данными гидропостов. При этом максимальное изменение уровня воды в водохранилище происходит в конце апреля – в период таяния снегов. Летние данные обычно значительно хуже отслеживают динамику изменения уровня воды, что может быть обусловлено, в частности, усилением влияния береговой зоны. Сравнение с данными по Рыбинскому водохранилищу, приведенными на сайте <http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb>, показывает, что сезонный ход в Рыбинском водохранилище имеет небольшую задержку по сравнению с Горьковским водохранилищем, что может быть связано с более северным расположением Рыбинского водохранилища (180 км севернее) и задержкой в таянии снегов и наполнении резервуара водохранилища.

#### ОСОБЕННОСТИ ФОРМ ОТРАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Несмотря на хорошее качественное соотношение данных спутниковых альтиметрических измерений с данными гидропостов для Горьковского водохранилища, можно отметить большой разброс



**Рис. 3.** Временная изменчивость уровня воды в Горьковском водохранилище по данным спутниковой альтиметрии и гидропостов (круги — данные спутника Т/Р, ромбы — данные спутника J1, сплошная линия — данные гидропостов) за период с 1992 по 2007 г.

данных ДЗ (рис. 3), связанный, по-видимому, с недостатками прямого перенесения алгоритмов расчета высоты водной поверхности, разработанных для водоемов большой площади (океанов и морей), на водоемы средней площади, в которых пятно рассеяния импульса радиоальтиметра в значительной степени приходится на область суши. В этой связи нами были проанализированы формы отраженных импульсов, принимаемых антенной альтиметра после отражения от подстилающей поверхности Горьковского водохранилища вблизи трека 142. Необходимые данные брались из базы данных SGDR спутника J1. Для анализа этой базы данных было разработано программное обеспечение, позволяющее проанализировать форму осредненного отраженного импульса для точек высокого пространственного разрешения (с интервалом осреднения 0.05 с). Разработанная программа позволяет следить за изменением формы импульса при движении точки осреднения по треку спутника. Примеры изменения формы импульса при движении точки в районе, отмеченном на карте белым кругом, показаны на рис. 4.

На нижнем графике рис. 4 (слева) изображены соответствующие формы осредненных импульсов, представляющие фактически зависимости принимаемой отраженной мощности от времени (по горизонтальной оси отложен номер гейта альтиметра, 1 гейт соответствует временному интервалу  $dt_i = 3.125$  нс, по вертикальной оси — мощность отраженного сигнала). Анализ форм импульсов позволяет предположить, что разброс данных об уровне воды связан с недостатками

стандартного алгоритма расчета, в котором временем прихода отраженного сигнала считается 31 гейт данного графика. Действительно, из рис. 4 видно, что отраженный сигнал может приходиться как раньше, так и позднее указанного гейта, причем ошибка в 1 гейт приводит к значительной ошибке в измерении уровня воды (на величину порядка  $dt_i \times c/2$ , где  $c$  — скорость света).

Это означает, что для средних по размерам водоемов необходима разработка специального алгоритма, позволяющего учесть его географические особенности. С этой целью нами была рассмотрена простейшая модель подстилающей поверхности, учитывающая изменение коэффициента обратного рассеяния при переходе от воды к суше в прилегающей к 142 треку области Горьковского водохранилища (“модельная” область изображена на рис. 6), и для данной модели произведен расчет форм отраженных импульсов.

Для расчета формы импульса, принятого альтиметром после отражения от подстилающей поверхности, использовалась теоретическая модель Брауна (Brown, 1997), которая применялась для случая излучения антенны в надир. В ней показано, что мощность сигнала, отраженного неровной поверхностью, можно записать в виде свертки

$$P(\tau) = \frac{c}{2} \int_{-\infty}^{\infty} q\left(\frac{c}{2}(\tau - \tilde{\tau})\right) P_{FS}(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau}. \quad (3.1)$$

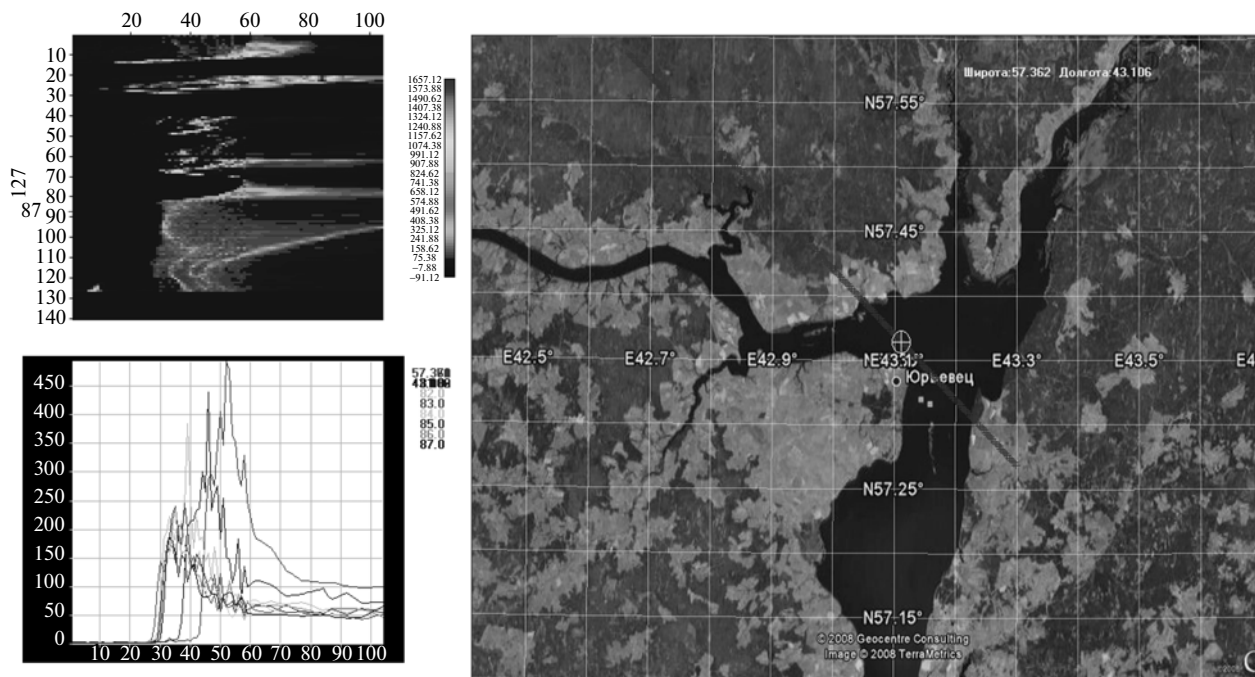


Рис. 4. Копия экрана разработанного программного обеспечения с примерами форм отраженных импульсов из базы SGDR спутника J1 (нижний график слева) и их яркостное изображение (верхний график слева) для точек высокого пространственного разрешения (с периодом осреднения 0.05 с) на акватории Горьковского водохранилища (справа – карта акватории Горьковского водохранилища с нанесенным на нее треком 142 и точкой, соответствующей исследуемому району).

Здесь  $q(z)$  – плотность вероятности для высоты случайной неровности (шероховатости), а

$$P_{FS} \sim \int \frac{I\left(t - \frac{2(r-H)}{c}\right) G^2 \sigma}{r^4} dA \quad (3.2)$$

– средняя мощность сигнала, отраженного плоской поверхностью, которая определяется нормированной формой импульса  $I(t)$ , расстоянием от радара до отражающего участка поверхности  $r$ , коэффициентом рассеяния отражающей поверхности  $\sigma$  и диаграммой направленности антенны  $G(\theta)$ ,  $H$  – средняя высота антенны радара над отражающей поверхностью,  $c$  – скорость света. При расчетах принималось

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2\delta^2), \\ G(\theta) &= \exp(-2\sin^2\theta/\gamma), \\ q(z) &= \frac{1}{s_i\sqrt{2\pi}} \exp(-z^2/2s_i^2), \\ \sigma_i &= \sigma_i(0) \cdot e^{-tg^2\theta/\alpha_i}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $\delta$  – эффективная длительность импульса антенны;  $\gamma$  – эффективная ширина диаграммы направленности антенны;  $\theta$  – угол между вертикалью и направлением от антенны на отражающий

участок поверхности;  $s_i$  – среднеквадратичная высота шероховатости поверхности;  $\sigma_i(0)$  – коэффициент обратного рассеяния;  $\alpha_i$  – эффективная ширина диаграммы рассеяния ( $i = 1$  – соответствует водной поверхности,  $i = 2$  – суше). Исполь-

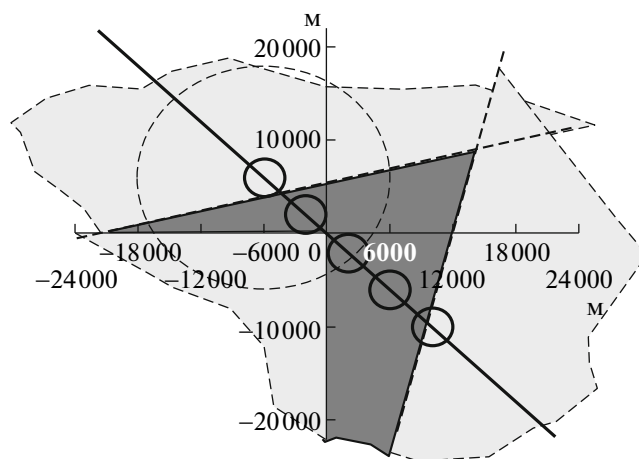
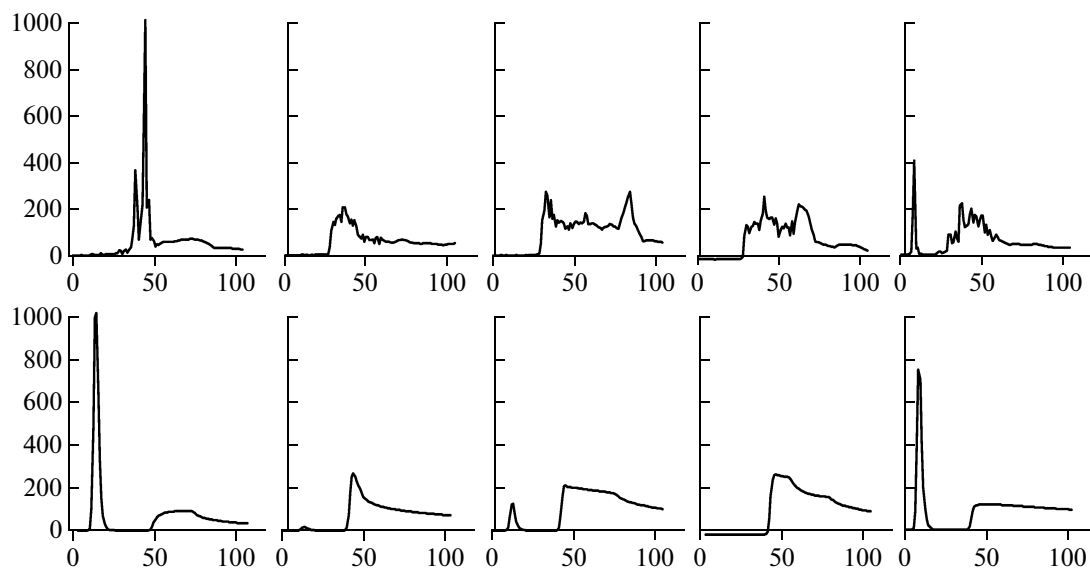


Рис. 5. Географическая модель акватории Горьковского водохранилища, прилегающей к треку 142 спутников Т/Р и J1 (суша – однородный серый цвет, вода – точечная штриховка, малые круги – положения спутника, большой пунктирный круг – пятно рассеяния для первого положения спутника); сплошная линия соответствует треку спутника.



**Рис. 6.** Зависимости мощности отраженного сигнала от времени: верхний ряд – на основе базы SGDR-данных спутника J1, нижний ряд – на основе модельных расчетов (пять графиков каждого ряда соответствуют пяти положениям спутника, отмеченным кругами на рис. 5).

зовались следующие модельные значения параметров антенны и рассеивающей поверхности:

$$\begin{aligned} \delta &= 3.125 \text{ нс}, & \gamma &= 0.0005, & H_1 &= 1\,334\,000 \text{ м}, \\ & & & & H_2 &= H_1 - 15 \text{ м}, \\ s_1 &= 0.05 \text{ м}, & s_2 &= 0.02 \text{ м} & \sigma_1(0) &= 0.1, \\ \sigma_2(0) &= 1, & \alpha_1 &= 0.1, & \alpha_2 &= 0.000001. \end{aligned}$$

Следует отметить, что приведенное выше значение  $\sigma_2(0)$  соответствует усредненному коэффициенту рассеяния от поверхности суши с учетом выделенных целей (сильно отражающих объектов).

На рис. 6 показаны формы отраженных импульсов, полученных для нескольких положений спутника, отмеченных кругами на рис. 5, на основе модельных расчетов (нижний ряд) и из баз SGDR-данных спутника J1 (верхний ряд). Проведенные нами расчеты показывают, что наличие суши, которая расположена севернее зеркала водохранилища, приводит к появлению дополнительных пиков мощности в отраженном импульсе, которые действительно наблюдаются в формах импульсов, полученных альтиметром. Если эти пики связаны с отражением от суши, то они не могут быть использованы при анализе высоты водной поверхности. Корректировка алгоритма расчета высоты поверхности с учетом особенностей нашего региона составляет задачу регионального “ретрекинга” (Rodriguez, Martin, 1994; Anzenhofer et al., 1999; Deng, Featherstone, 2006).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное сопоставление результатов обработки данных ДЗ по определению уровня воды в Горьковском водохранилище (р. Волга) с данными гидропостов Государственной сети наблюдений показало хорошее качественное соответствие сезонной динамики уровня воды. Однако для адекватного определения уровня воды в Горьковском водохранилище требуются изменения стандартного алгоритма вычисления мощности зондирующего импульса, отраженного от подстилающей поверхности, учитывающей особенности географического расположения изучаемого объекта. Эти изменения должны включать подробный анализ как характеристик рассеяния суши, которые не могут считаться постоянными и меняются от сезона к сезону и от года к году, так и состояние водной поверхности (например, ее “выглаживание”). Для определения этих характеристик в дальнейшем предполагается провести анализ обратной задачи рассеяния и составление регионального алгоритма ретрекинга, позволяющего с большей точностью определять высоту водной поверхности в Горьковском водохранилище по доступным спутниковым данным.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, проект № 08-05-97016-р\_поволжье\_a.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр. "МОРЕ" Межд. Института океана, 2005. 366 с.
- Alsdorf D., Birkett C., Dunne T., Melack J., Hess L. Water level changes in Large Amazon Lake measured with spaceborn radar interferometry and altimetry // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 14. P. 2671–2674. doi: 10.1029/2001GL012962.
- Anzenhofer M., Shum C.K., Rentsch M. Coastal Altimetry and Applications // *Tech. Rep.* 1999. № 464. Geodetic Science and Surveying. The Ohio State University Columbus, USA. 40 p.
- AVISO/Altimetry. User Handbook. Merged TOPEX/POSEIDON Products. AVISO. Toulouse. AVI–NT–02–101–CN. Edition 3.0. 1996. 201 p.
- Benada J.R. PODAAC Merged GDR (TOPEX/Poseidon) Generation B User's Handbook. Version 2.0. JPL D–11007. 1997. 131 p.
- Benveniste J., Berry P. Monitoring river and lake levels from space // *ESA Bull.* 2004. № 117. P. 36–42.
- Birkett C.M. The global remote sensing of lakes, wetlands and rivers for hydrological and climate research // *Proc. IGARSS'95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications.* IEEE. Firenze, Italy, 1995. V. 3. P. 1979–1981. doi: 10.1109/IGARSS.1995.524084.
- Birkett C.M. Contribution of the Topex NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands // *Water Resour. Res.* 1998. V. 34. № 5. P. 1223–1239.
- Birkett C.M., Mertes L.A.K., Dunne T., Costa M.H., Jasinski M.J. Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D20. P. 8059. doi:10.1029/2001JD000609.
- Brown G. The average impulse response of a rough surface and its applications // *Anten. Propag. IEEE Trans.* 1977. V. 25. № 1. P. 67–74. doi: 10.1109/TAP.1977.1141536.
- Campos I.O., Mercier F., Maheu C., Cochenneau G., Kosuth P., Blizkow D., Cazenave A. Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin // *Earth and Planetary Sciences.* 2001. V. 333. № 10. P. 633–643. doi: 10.1016/S1251-8050(01)01688-3.
- Chelton D.B. et al. Satellite Altimetry // *Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of techniques and applications* / Eds. Fu L.-L., Cazanave A. San Diego: Academic Press, 2001. P. 1–131.
- Cretaux J.-F., Calmant S., Abarca del Rio R., Kouraev A., Bergü-Nguyen M. Lakes studies from satellite altimetry // *Coastal Altimetry* / Eds. Vignudelli S., Kostianoy A., Cipollini P., Benveniste J. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 2010 (in press).
- Deng X., Featherstone W.E. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № C06012. doi:10.1029/2005JC003039.
- ENVISAT–ERS Exploitation Development of Algorithms for the Exploitation of ERS–ENVISAT Altimetry for the Generation of a River and Lake Product. 2004. DMU–RIVL–SPE–03–110. 17 p.
- Frappart F., Do Minh K., L'Hermitte J., Cazenave A., Ramillien G., Le Toan T., Mognard-Campbell N. Water volume change in the lower Mekong from satellite altimetry and imagery data // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 167. № 2. P. 570–584. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03184.
- Frappart F., Seyler F., Martinez J.M., Leon J., Cazenave A. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels // *Rem. Sens. Environ.* 2005. V. 99. № 4. P. 387–399. doi: 10.1016/j.rse.2005.08.016.
- Kostyanoi A.G., Zavalov P.O., Lebedev S.A. What do we know about dead dying and endangered lakes and sea? // *Dying and Dead Seas. Climatic versus Anthropic Causes.* Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004. P. 1–48.
- Koblinsky C.J., Clarke R.T., Brenner A.C., Frey H. Measurement of river level variations with satellite altimetry // *Water Resour. Res.* 1993. V. 29. № 6. P. 1839–1848. doi: 10.1029/93WR00542.
- Kouraev A.V., Zakharova E.A., Samain O., Mognard N.M., Cazenave A. Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992–2002) // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 93. № 1–2. P. 238–245. doi: 10.1016/j.rse.2004.07.007.
- Legresy B., Papa F., Remy F., Vinay G., van den Bosch M., Zanife O.-Z. ENVISAT radar altimeter measurements over continental surfaces and ice caps using the ICE-2 retracking algorithm // *Rem. Sens. Environ.* 2005. V. 95. № 2. P. 150–163. doi: 10.1016/j.rse.2004.11.018.
- Maheu C., Cazenave A., Mechoso C.R. Water level fluctuations in the Plata Basin (South America) from Topex/Poseidon Satellite Altimetry // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 3. P. 1143–1146. doi: 10.1029/2002GL016033.
- Papa F., Legresy B., Remy F. Use of the Topex–Poseidon dualfrequency radar altimeter over land surfaces // *Rem. Sens. Environ.* 2003. V. 87. № 2-3. P. 136–147. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00136-6.
- Picot N., Case K., Desai S., Vincent P. AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products. SMM–MU–M5–OP–13184–CN (AVISO). JPL D–21352 (PODAAC). 2008. Edition 4.1. 130 p.
- Remy F., Legresy B., Bleuzen S., Vincent P., Minster J.F. Dual-frequency Topex altimeter observation of Greenland // *J. Electron Waves and Appliance.* 1996. V. 10. № 11. P. 1505–1523.
- Remy F., Schaeffer P., Legresy B. Ice flow physical processes derived from ERS-1 high resolution map of the Antarctica and the Greenland ice sheets // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 139. № 3. P. 645–649. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00964.
- Rodríguez E., Martin J.M. Assessment of the TOPEX altimeter performance using waveform retracking // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № C12. P. 24957–24969. doi: 10.1029/94JC02030.



## Water Level Investigation in the Gorki Water Reservoir on the Basis of Satellite Altimetry

J. I. Troitskaja<sup>1</sup>, G. N. Balandina<sup>1</sup>, G. V. Rybushkina<sup>1</sup>, I. A. Soustova<sup>1</sup>, A. G. Kostjanov<sup>2</sup>,  
S. A. Lebedev<sup>3</sup>, A. A. Panjutin<sup>4</sup>, L. V. Filina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhniy Novgorod*

<sup>2</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>3</sup>*The Geophysical Centre, Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>4</sup>*Centre on Hydrometeorology and Monitoring of Environment, Nizhniy Novgorod*

The possibility of altimetry data use for definition of water level in the Gorki Water Reservoir of the Volga River is investigated. The analysis is based on the data of satellites TOPEX/Poseidon and Jason-1 (142 track), being in a free approach on a web-site [www.podaac.jpl.nasa.gov](http://www.podaac.jpl.nasa.gov). For processing altimetry data the LEGOS technique (see [www.legos.obs-mip.fr](http://www.legos.obs-mip.fr)) is applied. Comparison of altimetry results with the data of gauging stations of the State network of supervision is done; good qualitative conformity of seasonal dynamics of a water level in a water reservoir is shown. The reasons of available discrepancy of data on the basis of analysis of wave forms specific features in the impulses reflected from the spreading surface around the Gorki water reservoir are discussed.

**Key words:** altimetry data, water level, forms of the impulses, specific features in the impulses, Gorki Water Reservoir