

## Использование разновременных спутниковых данных для контроля состояния берегов искусственных водоемов

С.М. Борзов<sup>1</sup>, О.Р. Бикинеева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирск 630090, Россия*

*E-mail: borzov@iae.nsk.su*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
Новосибирск 630090, Россия*

Традиционно задача мониторинга за состоянием берегов водных объектов решается с использованием линейных замеров расстояний от реперных точек до бровки размываемого берега с интерполяцией результатов измерений. Данная работа посвящена исследованию возможности использования многоспектральных спутниковых изображений высокого разрешения для контроля и прогнозирования развития процесса разрушения берегов искусственных водоемов. Предложен и продемонстрирован метод мониторинга, основанный на оценке угла наклона дна прибрежной зоны путем определения положения границы вода-суша на нескольких изображениях, полученных в течение одного сезона при различном наполнении водохранилища. Основными этапами обработки являются: совмещение изображений, классификация, определение границы вода-суша, оценка угла наклона дна и представление результатов анализа в виде карты крутизны берегов. Эффективность ключевых процедур разработанного алгоритма продемонстрирована на примере обработки изображений Новосибирского водохранилища спутника SPOT 4 от 22.05.08 (уровень воды 273 см) и 8.08.08 (уровень воды 596 см). Показано, что анализ указанных изображений с разрешением 20 м позволяет оценить угол наклона дна в прибрежной зоне в диапазоне 0,5–10 градусов. Этого диапазона достаточно для того чтобы классифицировать различные участки береговой линии по их подверженности разрушению (типичные углы наклона для берегов искусственных водоемов порядка 2–3°).

**Ключевые слова:** обработка спутниковых изображений, обнаружение изменений, контроль разрушения берегов.

### Введение

Одним из негативных моментов, связанных с созданием искусственных водоемов, является изменение гидрологического режима рек и ландшафта прилегающей территории. По этой причине необходимо осуществлять непрерывное наблюдение за водными объектами с целью получения данных о деформациях их берегов и прогноза дальнейших изменений (Хабидов, 2009).

К основным методам мониторинга за состоянием берегов водных объектов относятся экспедиционные визуальные обследования и геодезические измерения. Традиционно данная задача решается с использованием линейных замеров расстояний от реперных точек до бровки размываемого берега с интерполяцией результатов измерений (Руководство ..., 1983). Это простой, но все же длительный и требующий значительных затрат способ, недостатком которого в т.ч. является субъективность в оценке размыва берега. С совершенствованием космических средств наблюдения появилась возможность получать объективную и оперативную информацию об изменениях, происходящих на поверхности, посредством анализа данных дистанционного зондирования Земли. В частности, спутни-

ковые изображения высокого пространственного разрешения (20 м и более) могут быть использованы для контроля состояния берегов.

Целью работы является исследование возможности использования космических изображений высокого разрешения для контроля и прогнозирования развития процесса разрушения берегов искусственных водоемов.

### **Описание используемого подхода**

Ярким представителем искусственных водоемов, на побережье которого приходится большое количество разрушаемых эрозией берегов, является Новосибирское водохранилище. Его площадь 1090 км<sup>2</sup>, максимальная ширина 22 км, длина 214 км. По проекту водохранилище предназначалось для энергетического и транспортного использования. Кроме того, в настоящее время данный водоем является основным источником водоснабжения прилегающих к нему населенных пунктов. На водохранилище осуществляется сезонное регулирование уровня воды путем изменения стока р. Оби в створе плотины. Наивысший уровень, который водоподпорные сооружения могут поддерживать в течение всего срока эксплуатации (нормальный подпорный уровень, НПУ), составляет 113,5 м., минимально допустимый в условиях нормальной эксплуатации (уровень мертвого объема, УМО) - 108,5 м. Максимальное изменение уровня в водохранилище (в чрезвычайных условиях) достигает 7 метров. Многолетние наблюдения показывают, что береговая линия водохранилища претерпевает постоянные изменения, процессы переработки берегов до настоящего времени происходят достаточно интенсивно и какой-либо стабилизации не наблюдается. Среднее отступление берега в верхней части водохранилища (50–60 км от плотины) – 0,3 м/год, в нижней – 0,7 м/год (Савкин, 2000). На отдельных участках за весь срок эксплуатации отступление составило до 500 м, в целом по водохранилищу общие потери земель к 2008 г достигли 22 км<sup>2</sup> (Савкин, 2009).

Из приведенных данных ясно, что контроль положения границы вода-суша при НПУ за длительный период наблюдения (десять и более лет) позволяет проследить историю изменения береговой линии и выделить участки берегов, на которых разрушение идет наиболее интенсивно. Однако для выполнения такого контроля требуются спутниковые изображения водного объекта высокого разрешения (1 м и менее). В данной работе рассматривается альтернативный вариант решения поставленной задачи. Контроль состояния берегов предложено осуществлять на основании того факта, что интенсивность процесса разрушения в значительной степени зависит от их крутизны и высоты (Зенкович, 1962). Если берег очень пологий, то энергия прибоя гасится без размывания, крутые же

берега, напротив, наиболее подвержены разрушению. Оценку угла наклона дна прибрежной зоны предложено выполнять путем обработки нескольких изображений, полученных при различном наполнении водохранилища в течение одного сезона. При этом, как далее будет показано, удовлетворительная точность может быть достигнута по данным существенно более низкого разрешения.

Для выполнения требуемой оценки уклона осуществляется выбор изображений контролируемого участка водохранилища, полученных в безледоставный период. Затем выполняется их геометрическое совмещение и бинарная классификация, а именно отделение воды от суши для определения положения береговой линии. С этой целью для каждого отсчета изображения рассчитывается индекс влагосодержания NDWI (Normalized Difference Water Index – нормированное соотношение зеленого и среднего ИК каналов) (Gao, 1996) и выполняется пороговая обработка полученного массива данных.

Далее на классифицированных изображениях определяется граница между двумя представленными классами, и для каждого участка берега строится зависимость положения раздела вода-суша от уровня наполнения водохранилища (профиль склона). Линейная интерполяция полученной зависимости позволяет оценить угол наклона дна прибрежной зоны.

Результаты анализа представляются на исходном изображении различным цветом границы вода-суша в зависимости от полученной оценки крутизны (угла наклона) берега.

Более сложный анализ результатов может выполняться с учетом долгосрочного изменения уклона дна за последние несколько сезонов, а также изменения положения границы вода-суша при НПУ для данного участка берега. Кроме того, поскольку устойчивость берега к размыванию зависит от прочности пород, слагающих берег, данная информация (при ее наличии) также может быть использована при составлении прогноза в качестве отдельных тематических слоев. Методика учета всех факторов и форма наиболее информативного представления результатов не являются предметом данной работы и должны быть определены совместно со специалистами, занимающимися мониторингом состояния береговых линий.

### **Демонстрация ключевых процедур**

Эффективность выполнения ключевых процедур разработанного алгоритма продемонстрирована на примере обработки изображений Новосибирского водохранилища, полученных со спутника SPOT. Спутники SPOT имеют в мультиспектральном режиме (зеленый, красный, ближний инфракрасный, коротковолновый инфракрасный диапазоны) пространственное разрешение 20 метров. Ширина полосы съемки – 60 км. Возможна съемка под уг-

лом до  $31,06^\circ$ , что позволяет увеличить частоту наблюдения данной точки поверхности в течение орбитального цикла (до одного раза в 2-3 дня) (Болсуновский, 2005).

На *рис. 1* приведены фрагменты двух изображений прибрежной территории в районе села Быстровка, полученных при значительно различающемся наполнении от 22.05.2008 (уровень воды 273 см) и от 08.08.2008 (уровень воды 596 см). Информация об уровне воды для соответствующих дат получена с сайта центра Российского регистра гидротехнических сооружений и государственного водного кадастра. Следует отметить, что данный участок береговой линии является одной из проблемных зон Новосибирского водохранилища, он требует постоянного контроля и проведения укрепляющих мероприятий.



*Рис. 1. Фрагменты изображения территории в районе села Быстровка от 22.05.2008(а) и от 08.08.2008 (б)*

Первоначально выполнялось совмещение изображений средствами программного комплекса ENVI. Программный комплекс имеет встроенную модель сенсора со спутника SPOT, и геопривязка происходит на основе информации, содержащейся в файле-заголовке изображения, при этом используется полная модель геометрии спутниковой орбиты. В качестве проекции была выбрана проекция UTM, а в качестве метода трансформирования

снимка метод триангуляции Делоне, как наиболее точный. При использовании данного метода по имеющимся опорным точкам строится нерегулярная сеть из треугольников, стремящихся к равносторонним, а затем интерполируются значения для получения регулярной сетки. Для более высокой точности результата в качестве метода дискретизации получаемых изображений был выбран метод кубической свертки, в котором значение пикселя в новом изображении вычисляется как аппроксимация значений 16-ти ближайших пикселей с использованием кубических полиномов.

Но в связи с невысокой точностью определения абсолютного положения спутника (до 350 м) между двумя изображениями, уже приведенными к общей картографической проекции UTM, присутствует значительный сдвиг. Поэтому далее была проведена процедура уточнения привязки по реперным точкам с использованием полиномиального преобразования первой степени. В качестве реперных точек были выбраны 8 перекрестков дорог, как точки местности, однозначно определяющиеся на обоих снимках и не изменившие своего положения. При этом среднеквадратичная ошибка точек привязки составила 0,003.

Классификация изображений выполнялась с использованием индекса влагосодержания NDWI и порога 0,4. Все точки, для которых индекс больше данного значения, относились к классу воды.

В качестве оценки уклона принималась величина обратно пропорциональная расстоянию между границами вода-суша на обрабатываемых изображениях (рис. 2). Для каждой точки границы при большем наполнении осуществлялся поиск ближайшей точки границы на втором изображении в пределах радиуса 20 элементов разрешения. Если же в пределах заданного радиуса точка границы на втором изображении не была обнаружена, то в качестве результата использовалось само значение радиуса. Данная процедура реализована на языке IDL.



Рис. 2. Выделенные береговые линии

Для отображения результатов обработки формируется комбинированное изображение. На исходном изображении при большом наполнении задуваются значения отсчетов на границе вода-суша во всех трех каналах, и в красный канал выводятся полученные в результате выполнения вышеописанных процедур значения (после увеличения контраста). Процедура формирования результирующего изображения реализована на языке IDL.

Таким образом, в итоге результаты представляются в виде исходного изображения, на котором береговая линия выделена красным цветом различной интенсивности: яркие участки соответствуют более крутым берегам, темные - более пологим (рис. 3).



Рис. 3. Наложение результатов определения крутизны берегов на исходное изображение

С учетом разрешения обрабатываемых изображений (20 м) и различия в уровне наполнения (323 см) расстояние между сформированными границами в 1 элемент разрешения соответствует углу наклона дна  $9,17^\circ$  (уклон 0,159), расстояние же равное 20 элементам соответствует -  $0,46^\circ$  (уклон 0,008). Анализ результатов оценки наклона дна в прибрежной зоне в районе села Быстровка (в одной из наиболее критичных в исследуемом плане зонах Новосибирского водохранилища) показывает, что этого диапазона достаточно, чтобы классифицировать различные участки береговой линии по их подверженности разрушению (типичные углы наклона для берегов искусственных водоемов порядка  $2,0-2,5^\circ$  (Хабилов, 2009)).

### Заключение

Разработаны программно-алгоритмические средства обработки спутниковых изображений высокого разрешения, позволяющие осуществлять контроль и прогнозирование развития процесса разрушения берегов искусственных водоемов путем оценки уклона дна в прибрежной зоне. Предложенный алгоритм основан на определении зависимости поло-



жения границы вода-суша от уровня наполнения водохранилища и построении высотного профиля для каждого участка береговой линии. Его основными этапами являются: совмещение изображений, классификация, определение границы вода-суша, оценка угла наклона дна и представление результатов анализа в виде карты крутизны берегов.

Эффективность ключевых процедур разработанного алгоритма продемонстрирована на примере обработки изображений Новосибирского водохранилища, полученных со спутника SPOT 22.05.2008 (уровень воды 273 см) и 08.08.2008 (уровень воды 596 см). Обработка выполнялась с использованием встроенных средств программного комплекса ENVI, а также специализированных функций, реализованных на языке IDL и интегрированных в среду ENVI. Показано, что анализ пары указанных изображений с разрешением 20 м позволяет оценить угол наклона дна в прибрежной зоне в диапазоне 0,5 - 10 градусов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-07-00202, № 13-07-12202), Программы Президиума РАН (проект № 15.3) и Программы СО РАН (интеграционный проект № 74).

### Литература

1. Болсуновский М.А. Система спутников ДЗЗ SPOT // Геопрофи. 2005. № 3. С. 19–21.
2. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
3. Руководство по изучению динамики размыва берегов рек при инженерных изысканиях методом наземной фототопографической съемки, М: Стройиздат, 1983.
4. Савкин В.М., Марусин К.В., Федорова Е.А. Искусственные пляжи для берегоукрепления и комплексного использования прибрежной зоны на Новосибирском водохранилище // Тр. Междунар. конф. «Создание и использование искусств. земельных участков на берегах и акватории водоемов», Новосибирск, 20-25 июля 2009. С. 255–261.
5. Савкин В.М. Эколого-географические изменения в бассейнах рек Западной Сибири (при крупномасштабных водохозяйственных мероприятиях). Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 152 с.
6. Хабидов А.Ш. Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
7. Gao B. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. № 58. P. 257–266.

## Application of multitemporal satellite data for the control of artificial reservoirs' coasts condition

S.M. Borzov<sup>1</sup>, O.P. Bikineeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Electrometry, Novosibirsk 630090, Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia*

*E-mail: borzov@iae.nsk.su*

Traditionally, the water objects coasts monitoring problem is solved using distance measurements from defined points up to the edge of eroded coast with interpolation of measurement results. The paper is devoted to research of a possibility to use high resolution satellite images for control and forecasting of the process of artificial reservoirs coasts destruction. A monitoring method based on estimations of the inclination angle of a coastal zone bottom by defining the water-land border position on several images received during one season at various water-levels of a basin, is offered. The basic stages of processing are: orthorectification of images, classification, definition of a wa-

ter-land border, estimation of the inclination angle of bottom and representation of results of the analysis as a map of coast steepness. Efficiency of key procedures of the developed algorithm is shown by the example of processing images of the Novosibirsk water basin from SPOT 4 of 22.05.08 (water level 273 cm) and 8.08.08 (water level 596 cm). It is shown that the analysis of the specified images with spatial resolution of 20 m allows estimating the bottom inclination angle in the coastal zone in the range of 0,5–10 degrees. This range is enough to classify various sites of the coastal line by their damageability (typical inclination angles of artificial reservoirs coasts is about 2–3 degrees).

**Keywords:** processing of satellite images, change detection, control of coasts destruction.

## References

1. Bolsunovskii M.A., Sistema sputnikov DZZ SPOT (SPOT satellite system), *Geoprofi*, 2005, No. 3, pp. 19–21.
2. Zenkovich V.P., *Osnovy ucheniya o razvitií morskikh beregov* (Bases of the doctrine about sea coasts development), Moscow: AN SSSR, 1962, 710 p.
3. *Rukovodstvo po izucheniyu dinamiki razmyva beregov rek pri inzhenernykh izyskaniyakh metodom nazemnoi fototopograficheskoi s"emki* (Study guide of dynamics of rivers coasts erosion at engineering works by a method of ground phototopographical shooting), Moscow: Stroiizdat, 1983.
4. Savkin V.M., K.V. Marusin, E.A. Fedorova, *Iskusstvennye plyazhi dlya beregoukrepleniya i kompleksnogo ispol'zovaniya pribrezhnoi zony na Novosibirskom vodokhranilishche* (Artificial beaches for bank protection and complex use of the coastal zone of Novosibirsk water basin), *Sozdanie i ispol'zovanie iskusstv. zemel'nykh uchastkov na beregakh i akvatorii vodoemov* (Creation and Use of Artificial Ground Areas on Coasts and Water Area of Reservoirs), Proc. Conf., Novosibirsk, 20–25 July, 2009, Novosibirsk, pp. 255–261.
5. Savkin V.M., *Ekologo-geograficheskie izmeneniya v basseinakh rek Zapadnoi Sibiri: (pri krupnomasshtabnykh vodokhozyaistvennykh meropriyatiyakh)* (Ecology-geographical changes in pools of the rivers of Western Siberia: (at large-scale water-economic actions)), Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN, 2000, 152 p.
6. Khabidov A.Sh., *Upravlenie sostoyaniem beregov vodokhranilishch* (Management of a condition of water basins coasts), Novosibirsk: SO RAN, 2009.
7. Gao B., NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, pp. 257–266.