

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ВОДОХРАНИЛИЩ**

© 2015 А.В. Бочаров, О.А. Тихомиров

Тверской государственный университет

Статья поступила в редакцию 27.04.2015

Проведена попытка использования данных дистанционного зондирования для оценки состояния подводной части берегового склона и изменений берегов водоема на примере Рыбинского водохранилища. Анализ профилей подводного берегового склона включал сравнение показателей глубин затопленных участков (полученных методами спутниковой батиметрии) и смоделированных поверхностей динамического равновесия побережья относительно ветрового волнения (рассчитанных по функции Дина). Анализ смещения берегов водохранилища выполнялся на основе совмещения космических снимков разных лет. По полученным результатам проведен сравнительный анализ основных участков изменения берегов Рыбинского водохранилища за 1985 – 2013 гг. и группировки подводных береговых склонов по типам профилей.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, спутниковая батиметрия, профиль равновесия, прибрежная зона, подводный береговой склон, Рыбинское водохранилище.

До недавнего времени батиметрическая съемка и исследование ложа водных объектов в основном базировались на измерениях корабельных эхолотов. Этот метод требует значительных затрат средств и времени. Развитие технологий дистанционного зондирования Земли предоставило экономичное решение для точного определения глубины водоемов. Спутниковая батиметрия является полезным инструментом разведки, которая может быть использована для отображения прибрежных глубин, характеристики прибрежной зоны и отслеживания изменений дна водных объектов. Определение глубины основано на разнице проникновения электромагнитных волн в водную толщу. Волны с большей длиной поглощаются водой сильнее, чем более короткие. Красные волны проникают до глубины 5 м, максимальная глубина проникновения более коротких зеленых лучей – 15 м, синие волны способны отражаться от дна на глубине около 30 м [10].

Целью настоящей работы является оценка возможностей использования данных дистанционного зондирования для изучения состояния подводной части берегового склона и изменений берегов водоема на примере Рыбинского водохранилища. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1) составить батиметрическую карту прибрежной зоны Рыбинского водохранилища на основе спутниковой информации методом, основанным на разнице проникновения электромагнитных волн различной длины в водную толщу;

*Бочаров Александр Вячеславович, аспирант кафедры физической географии и экологии. E-mail: bochallex@bk.ru*  
*Тихомиров Олег Алексеевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии и экологии. E-mail: tikhomirova@mail.ru*

2) построить профили равновесия подводной части рельефа берегового склона для побережья Рыбинского водохранилища;

3) выделить и провести группировку участков прибрежной зоны с превышением и дефицитом материала слагающих пород на подводном береговом склоне на основе сравнения фактического профиля дна с теоретическим профилем равновесия;

4) по спутниковым снимкам Landsat 1985 – 2013 гг. выделить основные участки изменений берегов Рыбинского водохранилища и дать оценку их приуроченности к результатам группировки подводных береговых склонов по отношению к профилю равновесия;

5) оценить возможности применения данных дистанционного зондирования для изучения подводных склонов и изменений береговой линии водохранилищ.

В работе использовались космические снимки со спутников Landsat на акваторию Рыбинского водохранилища, образованного в 1941 г. плотинами Рыбинского гидроузла. Конфигурация чаши водохранилища обусловлена основными формами затопленного рельефа Молого-Шекснинской низины. Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) составляет 101,81 м над уровнем моря (по Балтийской системе высот). Рыбинское водохранилище – мелководный водоем (средняя глубина 5,6 м).

**ПОЛУЧЕНИЕ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ПО СПУТНИКОВЫМ  
СНИМКАМ LANDSAT**

Существует широкое разнообразие эмпирических моделей оценки батиметрической информации путем установления статистиче-

ской взаимосвязи между значениями пикселей спутникового изображения и значениями глубин. Наиболее популярный подход, разработанный Lyzenga D. (1978, 1981, 1985), основан на том, что донное отражение электромагнитных волн является примерно линейной функцией и экспоненциально зависит от глубины водоема. Jupp D.L. (1989) предложил алгоритм определения глубины проникновения излучения (DOP-зоны) для каждого канала космического снимка, с последующей калибровкой глубины в DOP зонах. Stumpf R. и др. (2003) [12] представили алгоритм, использующий отношение показателей отражения электромагнитных волн в синем и зеленом каналах, и продемонстрировали его преимущества для получения батиметрических данных в отличие от стандартного линейного алгоритма преобразования. Измененная версия модели Lyzenga D. была предложена Conger C.L. и др. (2006), и содержит алгоритм с использованием одного канала космического снимка для получения батиметрических показателей [9].

В нашем исследовании использована методика, предложенная Stumpf R. и др. в 2003 г. Исходными данными являлись снимки Landsat, валидация результатов проводилась по батиметрическим измерениям Рыбинского водохранилища [1].

Первый этап создания батиметрической карты включает определение границ водной поверхности на снимке Landsat для создания маски границ водохранилища. Для этих целей использовано разделение пикселей по значению исходной яркости (DN) на две группы [13]. Наибольший контраст суши и водной поверхности проявляется в ИК – диапазоне (6-й канал Landsat-8). Расчет порогового значения между группами производился на основе профилей переходной зоны. При помощи ГИС-редактора составлено несколько графиков профиля прибрежной зоны в ИК-канале, содержащих часть берега и водную поверхность (рис. 1 – а).

Участки с низкими значениями пикселей являются водной поверхностью, в то время как зоны с повышенными показателями пикселей

представляют поверхность суши (рис.1 – б). В нашем случае пороговое значение пикселей суши и водоема составляет около 7000 (снимок Landsat-8). Пиксели меньше порогового показателя интерпретировались как водная поверхность. На основании этого метода выделены границы Рыбинского водохранилища. Анализируя распределение значений исходной яркости пикселей ИК-канала (Landsat), на участке прибрежной зоны (рис. 1 – в), можно убедиться в объективности применяемой методики.

Для повышения точности результатов проводилась минимизация влияния облаков и бликов на космическом снимке. Этот шаг предназначен для устранения радиометрического вклада ошибочных областей на снимке. Коррекции подверглись синяя (“blue”) и зеленая (“green”) полосы, используемые для расчёта глубин водоема. Для этого, на основании ИК-слоя, был создан полигон, который содержит как темные, так и яркие участки (блики, облака) водной поверхности. По маске полигона были извлечены данные для ИК (1,560 – 1,660 мкм), синего (0,450 – 0,515 мкм) и зеленого (0,525 – 0,600 мкм) каналов снимка Landsat-8. На основании этих данных составлены диаграммы рассеяния значений пикселей синего (Y) и ИК (X) каналов, а также зеленого (Y) и ИК (X) каналов.

Для расчета наклона линий трендов синего и зеленого слоев взяты две координатные точки каждого графика – нижняя левая точка (X1; Y1) и верхняя правая (X2; Y2). Далее для этих слоев был рассчитан наклон тренда (Slope) с использованием следующего уравнения:

$$Slope = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} \quad (1)$$

Коррекция и снижение влияния облаков и бликов растрового изображения синего канала съемки Landsat проведено с помощью уравнения:  $Blue_{fix} = blue - Slope_{blue} \times (IR - X1)$ . (2)

Для зеленой полосы применено уравнение:  $Green_{fix} = green - Slope_{green} \times (IR - X1)$ . (3)

В результате проведенных операций получены



Рис. 1. Пример расчета границ водоема на основе деления пикселей ИК-канала по пороговому значению исходной яркости (DN)

а – профиль прибрежной зоны на снимке Landsat в ИК-канале; б – график значений DN по профилю прибрежной зоны в ИК-канале; в – пример распределения значений DN на участке прибрежной зоны в ИК-канале

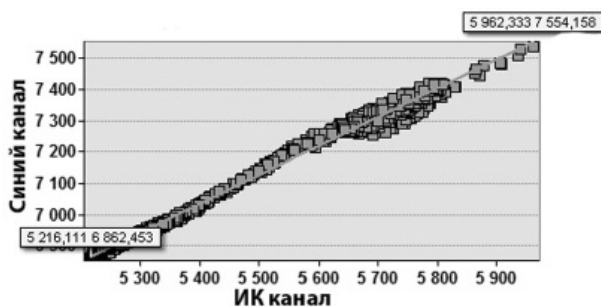


Рис. 2. Пример диаграммы рассеяния значений пикселей синего и ИК каналов

откорректированные растровые изображения синего и зеленого каналов снимка Landsat и маска границ водоема. Согласно методике предложенной Stumpf, отношение натуральных логарифмов синего и зеленого каналов Landsat является величиной ( $Z$ ), которая имеет тесную зависимость с глубиной водоема.

$$Z = \frac{\ln(\text{blue}_{fix})}{\ln(\text{green}_{fix})} \quad (4)$$

По формуле (4) рассчитана величина  $Z$  с размером ячеек  $30 \times 30$  м в пределах границ водохранилища. Следующим этапом было сравнение натуральных данных глубин, полученных с эхолотов, с вычисленными значениями  $Z$ . Для этого составлена таблица, столбцами которой стали глубины от 0,5 до 12 м с шагом 0,5 м. В таблицу вносились значения  $Z$  соответствующие глубинам. Для каждой глубины выбрано не менее 10 случайных значений и рассчитано среднее для показателя  $Z$ . На основании средних значений был построен график (рис. 3), характеризующий зависимость глубины от значений  $Z$ . Полученные данные показывают хорошую корреляцию глубины и показателя  $Z$  ( $r = 0,63$  для глубин до 12 м). Наиболее сильная зависимость параметров наблюдается до глубины 5 м (коэффициент корреляции равен 0,86).

Для большей точности использовано уравнение регрессии (5), рассчитанное для глубины до 5 м (рис. 4). Полученные результаты не корректны для глубоководных участков, но учитывая среднюю глубину водоема (5,6 м) и цель – исследование прибрежных территорий, можно утверждать о возможности использования таких результатов

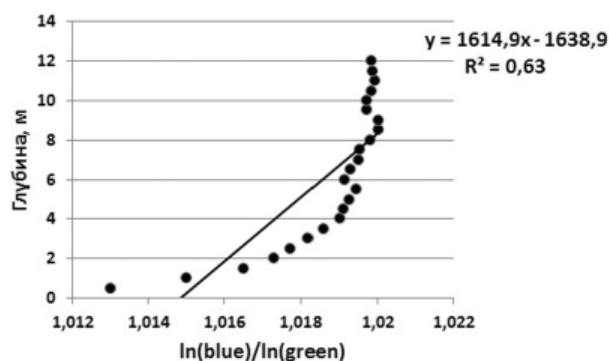


Рис. 3. Корреляция отношения  $\ln(\text{blue})/\ln(\text{green})$  и глубины до 12 м (Рыбинское вдхр., снимок Landsat 8 (июнь 2013 г.))

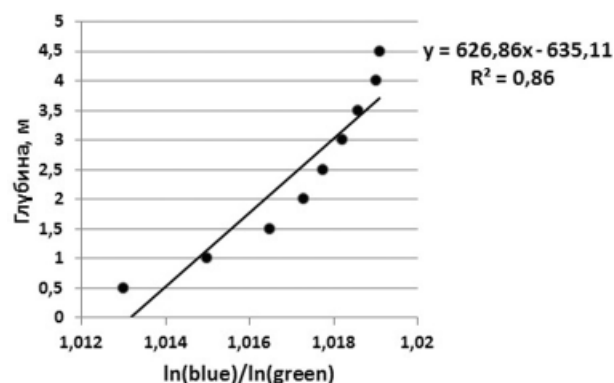


Рис. 4. Корреляция отношения  $\ln(\text{blue})/\ln(\text{green})$  и глубины до 5 м (Рыбинское вдхр., снимок Landsat 8 (июнь 2013 г.))

для решения поставленных задач, при этом их точность существенно увеличивается.

$$\text{Depth} = 626,86 * Z - 635,11. \quad (5)$$

В ГИС-редакторе, на основании уравнения регрессии (5), произведено вычисление глубин Рыбинского водохранилища. Анализ полученных батиметрических данных позволил выявить ряд методических сложностей: 1) расчет значений с высокой степенью точности возможен для глубин не более 5 м; 2) установлены случаи отрицательных значений для глубин менее 0,5 м; 3) под влиянием дымки, облачности, взвешенных частиц, а также бликов водной поверхности возможны искажения результатов.

Данные спутниковой батиметрии позволяют производить характеристику подводного рельефа водохранилища. Первичная оценка состояния форм подводного рельефа показала наличие четырех обширных мелководных зон (глубины до 2 м). Выделенные зоны приурочены к Волжскому и Моложскому плесам и к западным побережьям Центрального и Рожновского мысов. Представленные мелководья являются склонами древних озерных и речных террас затопленной Молого-Шекснинской низины [2].

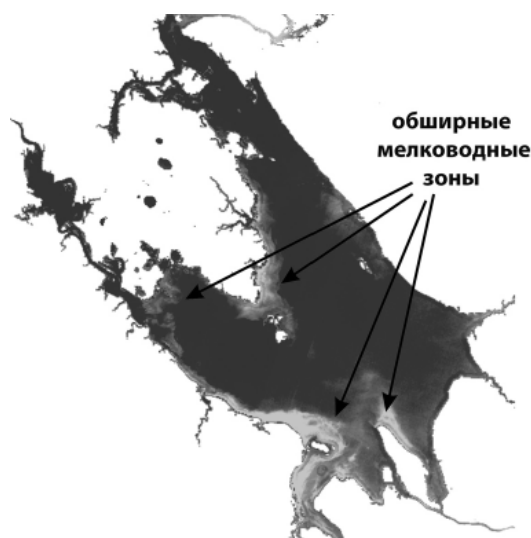


Рис. 5. Растр глубин Рыбинского водохранилища по данным Landsat

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ГРУППИРОВКА ПОДВОДНЫХ БЕРЕГОВЫХ СКЛОНОВ

На следующем этапе исследований проводился анализ состояния подводного рельефа прибрежной зоны, он выполнялся на основе выделения различных типов профилей подводного берегового склона. Основная причина переработки берегов на Рыбинском водохранилище волновая абразия. Берега, образованные преимущественно волновыми процессами могут быть абразионными и аккумулятивными (рис. 6). В силу разных причин (геологическое строение, высота волн и повторяемость ветрового волнения, угол подхода волн к береговой черте и др.) на водохранилищах могут формироваться участки затопленных склонов слабо подверженные волновой переработке. Эти берега представляют собой малоизмененный первичный склон, существовавший на момент затопления чаши водоема.

Изменение первоначальной формы береговых склонов, в результате воздействия водохранилища, как правило, характеризуется разрушением надводной части склона волнами и образованием аккумулятивной береговой отмели [5]. В настоящее время нарастание отмели на участках с песчаными и моренными грунтами происходит в основном за счет абразии берега. Ширина отмелей переформируемых берегов колеблется от 18 до 160 м [2]. По мере приближения профилей береговых склонов к устойчивым, скорость береговых переформирований уменьшается и формируется профиль равновесия. Интенсивность приближения береговых склонов к равновесным состояниям зависит от силы волнового воздействия, состава пород, повторяемости штормов. В зависимости от совокупности условий при дефиците наносов образуются эрозионные, а при избытке поступающего материала – аккумулятивные профили подводных береговых склонов (рис.6).

Выполняемая в работе группировка подводных береговых склонов основана на прогнозировании конфигурации профиля динамического равновесия подводного берегового склона и сравнении его с реально существующим профилем. Моделью, описывающей устойчивый профиль подводного рельефа по отношению к существующему волновому климату и сохраняющий усредненные морфометрические параметры с течением лет, является профиль равновесия Брууна-Дина [3,7,8]. Форма динамически равновесного профиля описывается функцией:

$$h(x) = Ax^{2/3}, \quad (6)$$

где  $h$  – глубина водоема в интервале от 0 до  $D_c$ ;  $D_c$  – глубина замыкания – предельная глубина до которой происходит перемещение наносов, а, следовательно, и текущие колебания формы

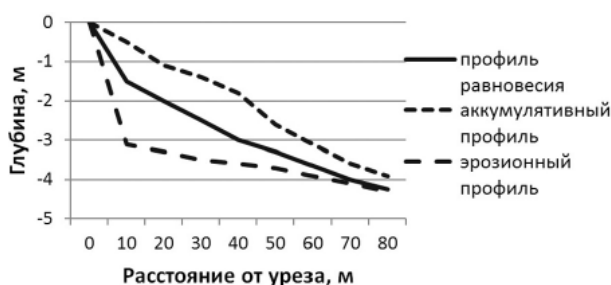


Рис. 6. Примеры типов профилей подводного берегового склона

профиля;  $A$  – параметр крутизны профиля, зависящий от медианной крупности материала ( $d_{50}$ ): чем крупнее материал, тем круче профиль;  $x$  – расстояние от берега. Параметр крутизны определяется по следующим соотношениям [4, 11]:

$$\begin{aligned} A &= 0.41 \cdot d_{50}^{0.94} \text{ при } d_{50} < 0.4 \text{ мм} \\ A &= 0.23 \cdot d_{50}^{0.52} \text{ при } 0.4 \leq d_{50} < 10 \text{ мм} \\ A &= 0.23 \cdot d_{50}^{0.28} \text{ при } 10 \leq d_{50} < 40 \text{ мм} \\ A &= 0.46 \cdot d_{50}^{0.11} \text{ при } 40 \leq d_{50} \text{ мм} \end{aligned} \quad (7)$$

В этих формулах  $A$  –  $m^{1/3}$ ,  $d_{50}$  – мм.

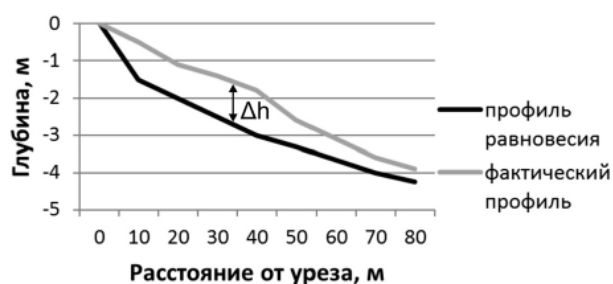
Известно, что модель Дина для профиля динамического равновесия справедлива для морских побережий. В своей работе Лыгин А.А и др. [4] обосновывают возможность использования формулы Дина для расчета профиля динамического равновесия подводного берегового склона применительно к берегам крупных водохранилищ.

Рыбинское водохранилище – водоем котловинного типа, находится в достаточно однородных геолого-геоморфологических условиях [6]. Подводные прибрежные склоны в основном сложены песчаным грунтом и суглинками, средняя медианная крупность частиц по данным [2] равна 0,1 мм. Вычисления для построения профилей были проведены с использованием усредненных показателей крупности материала. Глубина замыкания ( $D_c$  – максимальная глубина волнового воздействия при данных условиях) не рассчитывалась, что связано с изучением водоема в целом, а не единичного профиля с определенным волновым режимом. Зона обследования была установлена шириной в 90 м (три пикселя Landsat). Площадь исследования составила 270 км<sup>2</sup> водной поверхности – это порядка 3 млн. пикселей на снимках Landsat. Для данной крупности частиц значение коэффициента  $A$  в формуле Дина в соответствии с соотношениями (7) равно 0,47, и выражение (6) принимает вид:

$$h(x) = 0,47x^{2/3}. \quad (8)$$

По формуле (8) рассчитаны растры динамического равновесия подводного берегового склона. Растр расстояния от берега ( $x$ ) получен в ГИС-редакторе, при помощи функции «Евклидово расстояние». В дальнейшем была рассчитана разница между растром профиля динамического равновесия и растром реально существующих профилей подводных береговых склонов ( $\Delta h$ ).

Показатель  $\Delta h$  характеризует состояние

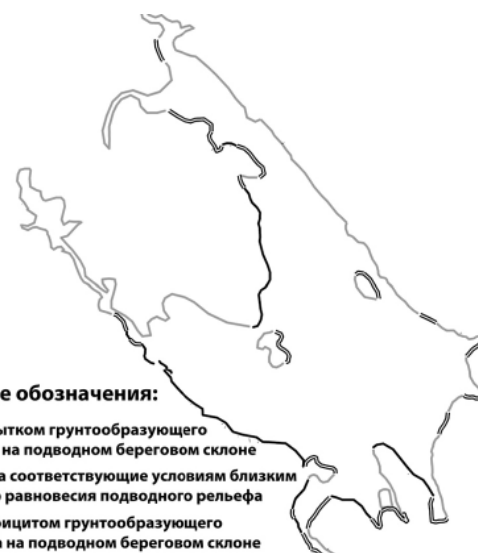


**Рис. 7.** Разница между профилем динамического равновесия и реально существующим профилем подводного берегового склона ( $\Delta h$ )

подводного рельефа относительно профиля равновесия. Выделение зон произведено на основе пороговых значений использованных в классификации Д.В. Корзина [3]. Предлагаемая группировка (таблица 1) позволяет перейти от абсолютных отметок глубин к относительным показателям, которые определяются условиями равновесия рельефа дна. Под условным избытком понимается превышение количества материала на подводном береговом склоне по сравнению с профилем равновесия. Дефицит подразумевает недостаток грунтообразующего материала на подводном склоне относительно профиля равновесия.

Выделенные зоны подводного рельефа по критерию значения  $\Delta h$  приведены на рис. 8. Зоны с условным избытком грунтообразующего материала на подводном береговом склоне прилегают к открытым участкам западного побережья Главного плеса. Мощности ветрового волнения здесь недостаточно для полного выноса размываемого материала за пределы прибрежной зоны. Над водоемом преобладают ветры юго-западных и западных румбов, этот факт, вероятно, и является решающим в объяснении причин возникновения обширных отложений у западных берегов Главного плеса. Кроме того, избыток материала на подводном береговом склоне может быть связан с недостаточно полной переработкой ветровым волнением затопленных форм рельефа за время существования водоема.

Зоны, испытывающие дефицит грунтообра-



**Условные обозначения:**

- Зоны с избытком грунтообразующего материала на подводном береговом склоне
- Участки дна соответствующие условиям близким к профилю равновесия подводного рельефа
- Зоны с дефицитом грунтообразующего материала на подводном береговом склоне

**Рис. 8.** Участки прибрежной зоны Рыбинского водохранилища по преобладающим типам подводных береговых склонов

зующего материала на подводном береговом склоне, типичны для восточных побережий Главного, Волжского, большей части Шекснинского и, практически, всего Моложского плесов. Эти участки характеризуются меньшим развитием береговых отмелей и большими углами наклона уступа подводного берегового склона. Причины их образования, либо абразия и эрозия чаши водоема, либо первичный депрессивный профиль подводного берегового склона. В приурезовой части дна значения  $\Delta h$  могут быть как положительными, так и близкими к нулевому значению, что связано не с аккумулятивными процессами, а с характерной формой абразионного профиля, имеющего ряде случаев выпуклую форму [3].

Участки дна, соответствующие условиям равновесия прибрежного рельефа относительно волнового режима, типичны для восточных побережий наиболее крупных торфяных островов-сплавин, устьевых участков впадения притоков в водохранилище, а также для некоторых участков западных берегов Главного и Шекснинского плесов.

**Таблица 1.** Интерпретация значений  $\Delta h$

$\Delta h > 0.5$	Зоны с превышением (избытком) грунтообразующего материала на подводном береговом склоне (аккумулятивные участки, либо сохраняющие первичный профиль, сформированный до затопления чаши водохранилища).
$-0.5 \leq \Delta h \leq 0.5$	Участки дна соответствующие условиям близким к профилю равновесия подводного рельефа (сформированы вследствие интенсивного ветрового волнения и сохраняющие усреднённые морфометрические параметры).
$\Delta h < -0.5$	Зоны с дефицитом грунтообразующего материала на подводном береговом склоне (абразионные участки, либо испытывающие дефицит наносов на первичный депрессивный профиль, определенный понижениями рельефа на момент затопления чаши водохранилища).

## ВЫДЕЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ИЗМЕНЕНИЯ БЕРЕГОВ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Анализ смещения берегов водохранилища выполнялся сравнительно-картографическим методом на основе совмещения космических снимков разных лет. По данным спутника Landsat-8, при помощи порогового значения яркости пикселей (DN) водной поверхности и суши в ИК диапазоне, получены конфигурации Рыбинского водохранилища для 1985 и 2013 гг. Используемые снимки сделаны в июне при уровне водохранилища близкого к НПУ, поэтому сравнение результатов уместно.

Степень развития процессов переформирования абразионных берегов тесно связана с продолжительностью существования водохранилища. К настоящему времени процесс переработки берегов Рыбинского водохранилища приобретает затухающую форму, составляя в среднем 0,5 м/год, или в сумме около 14 м за период с 1985 по 2013 гг. [5]. Разрешающая способность снимков Landsat – 30 м, что позволяет оценить лишь часть происходящих процессов и выделить наиболее крупные зоны разрушений. Поиск изменений береговой линии осуществлялся в ГИС-редакторе путем наложения границ водоема в 1985 и 2013 гг. Анализ результатов выявил только отступление берегов, процессов расширения суши, на территориях ранее занимаемых водохранилищем, выявлено не было. По данным полученным со снимков Landsat, площадь водохранилища с 1985 по 2013 гг. за счет разрушения берегов и остров увеличилась на 23,5 км<sup>2</sup> (около 0,5% от площади водоема при уровне водохранилища близком к НПУ). На рис. 8 показаны основные участки отступления берегов.

Осадконакопление и формы профиля берегового склона котловин водохранилищ в значительной степени обуславливают процессы их дальнейшего развития. Сравнительный анализ основных участков изменения берегов Рыбинского водохранилища за 1985 – 2013 гг. (рис. 9) и группировка подводных береговых склонов по типам профилей (рис. 8) показали приурочен-



Рис. 9. Основные участки отступления берегов Рыбинского водохранилища (1985 – 2013 гг.)

ность мест отступления береговой линии к зонам, испытывающим дефицит грунтообразующего материала на подводном береговом склоне (70 %); к зонам тяготеющим к профилю дна на стадии стабилизации (18 %); и к зонам с избытком грунтообразующего материала на подводном береговом склоне (12 %).

Примеры изменения берегов приведены на рис. 10. Результаты анализа показывают, что наибольшему воздействию подвержены выступающие формы рельефа, что способствует выравниванию береговой линии. Интенсивной переработке подвержены прибойные стороны островов, что приводит к уменьшению площадей этих участков суши или даже к их полному исчезновению.

### ВЫВОДЫ

Алгоритм, предложенный Stumpf R. и др. в 2003 г., позволил на основе данных дистанционного зондирования Земли получить карту глубин Рыбинского водохранилища. По результатам спутниковой батиметрии проведена характе-

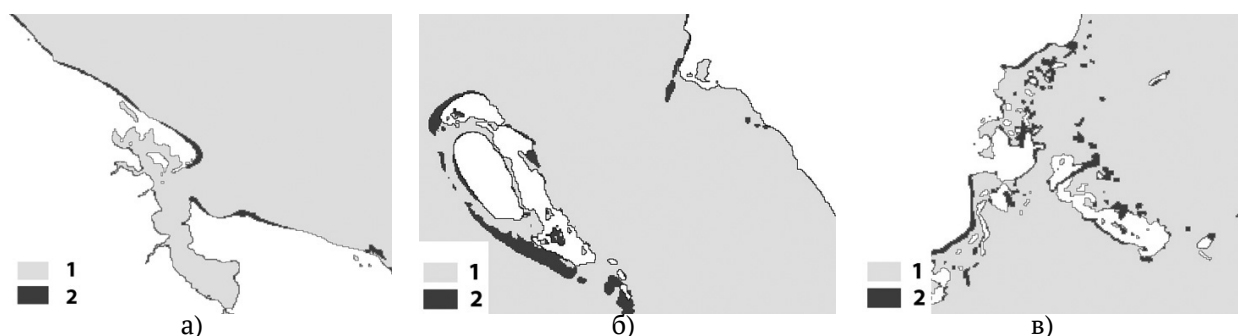


Рис. 10. Примеры изменения береговой линии по данным снимков Landsat (1 – границы Рыбинского водохранилища в 1985 г.; 2 – отступление береговой линии с 1985 по 2013 гг.) а – разрушения выступающих частей береговой линии; б – разрушение островов со стороны, более подверженной ветровому волнению; в – полное исчезновение небольших островов

ристика подводного рельефа прибрежной зоны водоема. Первичная оценка состояния форм подводного рельефа показала наличие четырех обширных мелководных зон, генезис которых связан с исходными формами рельефа Молого-Шекснинской низины на момент заполнения водохранилища. Существенным показателем развития прибрежных зон является состояние подводных склонов водоема. Основываясь на результатах спутниковой батиметрии Рыбинского водохранилища, при помощи ГИС-инструментов проведен анализ рельефа подводных береговых склонов для 90-метровой прибрежной зоны. Существующие профили рельефа дна соотносились с построенными по модели Дина профилями равновесия относительно волнового режима побережья Рыбинского водохранилища. Оценка состояния рельефа подводной части береговой зоны, проведенная путем выделения участков по отношению к профилю равновесия показала: 1) участки с равновесным профилем береговых склонов типичны для восточных побережий крупных торфяных островов-сплавин, большей части Волжского плеса, мест впадения притоков в водохранилище, а также для некоторых участков западных берегов Главного и Шекснинского плесов; 2) зоны с избытком грунтообразующего материала на подводном береговом склоне широко представлены в условиях западного побережья Главного плеса; 3) зоны, испытывающие дефицит грунтообразующего материала на подводном береговом склоне характерны для восточных побережий Главного и Волжского плесов, а также большей части Шекснинского, и, практически, всего Моложского плесов.

В ходе выполнения работы выделены основные участки изменения берегов Рыбинского водохранилища. Полученные результаты позволили установить, что в настоящее время: 1) наиболее подвержены изменениям границы открытых участков Главного плеса; 2) процессы разрушения направлены на выравнивание береговой линии, в первую очередь, за счет трансформации ее выступающих частей; 3) наблюдается существенное уменьшение количества малых прибрежных островов. Анализ основных участков изменения берегов Рыбинского водохранилища и их группировка по преобладающим типам подводных береговых склонов показали тяготение измененных участков к зонам испытывающим дефицит грунтообразующего материала на подводном береговом склоне (70%), на втором месте участки с профилем дна на стадии стабилизации, и менее всего представлены зоны с избытком грунтообразующего материала на подводном береговом склоне. По результатам обработки снимков Landsat, площадь водохранилища с 1985 по 2013 гг., за счет разрушения берегов и островных форм, увеличилась на 23,5 км<sup>2</sup> (около 0,5% от площади

водоема при НПУ).

Предложенная методика может быть использована для целей исследования состояния береговых склонов в пределах крупных водоемов. Ограничивающим фактором является 30-метровая разрешающая способность аппаратуры спутников Landsat, что позволяет рекомендовать использование платных спутниковых систем более высокого разрешения (например, Ikonos и WorldView). Также следует учитывать ошибки, возникающие за счет обширных мелководий, где незначительные колебания уровня водохранилища существенно изменяют площадь водной поверхности.

Результаты исследования подтверждают возможность и перспективность использования данных дистанционного зондирования для изучения изменения береговой линии и прибрежного рельефа подводной части водохранилищ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас единой глубоководной системы европейской части РСФСР. Том 2. 1987. 47 с.
2. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Водохранилища Верхней Волги / [ред.: З.А. Викулина, В.А. Знаменский]. Л.: Гидрометеопиздат, 1975. 291 с.
3. Корзин Д.В. Динамика рельефа береговой зоны северного побережья Самбийского полуострова (юго-восточная Балтика): дис. ...канд. геогр. наук. М., 2012.
4. Лыгин А.А. Обоснование применения функции Дина для расчета профиля динамического равновесия водохранилищ//Морские берега – эволюция, экология, экономика. Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня основания Рабочей группы «Морские берега». Краснодар, 2012. С 248–251.
5. Пояснительная записка к проекту правил технической эксплуатации и благоустройства Рыбинского и Горьковского водохранилищ. Тверь, 2013. 264 с.
6. Хабидов А.Ш. Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с.
7. Bruun P. Coastal erosion and development of beach profiles // U.S. Army Beach Erosion Board Technical Memorandum. 1954. No. 44.
8. Dean R.G. Equilibrium beach profiles. Characteristics and applications // J. of Coastal Research. 1991. Vol. 7, No 1. P. 53–84.
9. Doxania G., Papadopoulou M. Shallow-water bathymetry over variable bottom types using multispectral Worldview-2 image // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012 Melbourne, Australia. 2012. Vol. XXXIX-B8. P. 159-166.
10. Green E.P., Mumby P.J. Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management. France, Paris: UNESCO. 2000. 316 p.
11. Hanson H., Kraus N.C. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change / Tech. Report CERC-89-19. Coastal Engineering Research Center. US Army

- Corps of Engineers. 1989. 247 p.
12. *Stumpf R., Holderied K.* Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // *Limnology and Oceanography*. 2003. № 48. P. 547-556.
13. The IHO-IOC GEBCO Cook Book // IHO Publication B-11 IOC Manuals and Guides, 63, September 2014. 2014. 331 p.

## **THE USE OF REMOTE SENSING DATA TO ASSESS CHANGES IN THE COASTAL ZONE OF THE RESERVOIRS**

© 2015 A.V. Bocharov, O.A. Tikhomirov

Tver State University

You attempted to use remote sensing data to assess the state of the underwater coastal slope and changes the waterfront and the example of the Rybinsk Reservoir. Analysis of the profiles of the underwater coastal slope includes a comparison of the depth of the flooded areas (obtained by satellite bathymetry) and modeled surfaces of dynamic equilibrium with respect to the coast wind waves (calculated by the function of Dean). Analysis of the displacements of the reservoir was carried out on the basis of combination of satellite images from different years. According to the results, a comparative analysis of the main areas of change in the coast of the Rybinsk reservoir for 1985 - 2013 years. and grouping underwater coastal slopes types of profiles.

*Keywords:* remote sensing, satellite bathymetry, the profile of equilibrium, the coastal zone, underwater coastal slope, Rybinsk Reservoir.