



УДК 528.88; 551.4; 627.8

Определение морфометрических характеристик искусственных водоемов по данным дистанционного зондирования (на примере водохранилищ Суховской и Тельминской ГЭС)

Е. Н. Сутырина (ensut@rambler.ru)

Аннотация. Представлены результаты применения цифровой модели рельефа, построенной на основе данных SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), для оценки морфометрических характеристик водохранилищ.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, данные SRTM, морфометрические характеристики, водохранилище.

Актуальность

Использование данных дистанционного зондирования для анализа рельефа является одним из приоритетных направлений для множества отраслей научных исследований и хозяйственной деятельности, включая геологическую разведку территорий, строительство, промышленность [8].

Многообразные морфометрические характеристики рельефа находят широкое применение как в теоретических, так и в прикладных исследованиях, где необходима количественная оценка свойств земной поверхности [6]. Например, получение количественных морфометрических сведений о форме и структуре поверхности речной долины является неотъемлемым этапом при проектировании водохранилищ. К основным морфометрическим характеристикам водохранилищ, рассматриваемым в данной работе, относятся значения площади зеркала, объема, средней глубины и критерия мелководья при различном наполнении водохранилищ, а также некоторые другие характеристики.

Определение морфометрических характеристик водохранилища путем планиметрирования горизонталей на топографических картах является одним из трудоемких этапов при проектировании ГЭС. Дополнительные трудности на данном этапе возникают в связи с отсутствием в открытом доступе крупномасштабных картографических материалов. Кроме этого большая высота сечения рельефа (от 5 до 10 м для плоскоравнинной залесенной, равнинной пересеченной и холмистой местностей [3]) на топографических картах масштаба от 1:10 000 до 1:50 000, рекомендуемых к использованию при проектировании водохозяйственных объектов [4], делает затруднительным их применение при изучении проектов низконапорных ГЭС.

В настоящее время в различные морфометрические исследования активно вовлекаются цифровые модели рельефа. На примере нереализованных проектов Суховской и Тельминской ГЭС нами изучена возможность определения морфометрических характеристик водохранилищ с использованием геоинформационных технологий и цифровой модели рельефа, построенной на основе данных дистанционной радарной топографической съемки.

Проекты строительства на Ангаре Суховской и Тельминской ГЭС, установленной мощностью по 400 МВт каждая, разрабатывались в середине 50-х гг. XX в. Они должны были разместиться между Иркутской и Братской ГЭС: одна вблизи железнодорожной станции Суховская, другая – возле населенного пункта Тельма. Каждая ГЭС должна была иметь плотину с напором в 12 м. Это обеспечило бы среднегодовую выработку электроэнергии до 1,6 и 1,9 млрд кВт·ч Суховской и Тельминской ГЭС соответственно [10].

Сооружение Иркутской, Братской и Усть-Илимской ГЭС Ангарского каскада поставило Иркутскую область в исключительные энергетические условия и сделало в среднесрочной перспективе строительство Суховской и Тельминской ГЭС неактуальным. Однако в настоящее время в связи с высокой степенью износа (56,7 %) основных фондов ОАО «Иркутскэнерго», низким уровнем технического состояния оборудования коммунальных котельных и тепловых сетей, ростом тарифов на электрическую и тепловую энергию и прогнозируемым ростом потребления электроэнергии [9] вновь поднимается вопрос о пересмотре ранее неактуальных проектов строительства дополнительных ГЭС на территории Иркутской области.

Используемые материалы

В качестве исходных материалов использовались данные SRTM, т. е. данные радарной топографической съемки поверхности земного шара, произведенной методом радарной интерферометрии с борта космического корабля многоцелевого использования «Шаттл» [13]. Данная съемка проводилась в течение 11 дней в феврале 2000 г. почти на всей территории суши от 60° с. ш. до 54° ю. ш. и некоторых участках океанов с помощью двух радиолокационных сенсоров SIR-C (Shuttle Imaging Radar-C) и X-SAR (X-band Synthetic Aperture Radar). В ходе миссии было собрано более 12 терабайт информации о рельефе Земли. В результате обработки полученных данных была получена цифровая модель рельефа, охватывающая 85 % поверхности Земли. Разрешение семиглобальной цифровой модели рельефа SRTM равно 3 арксекундам, что для исследуемой территории соответствует размеру пикселя около 56×92 м соответственно по долготе и широте.

Данные SRTM доступны бесплатно в нескольких версиях: предварительной (версия 1), окончательной (версия 2) и обработанных (версии 3 и 4). Окончательная версия прошла дополнительную обработку, выделение береговых линий и водных объектов, фильтрацию ошибочных значений. Обработанные версии с исправленными областями, в которых были про-

пущены значения, производится CGIAR (Consultative Group for International Agriculture Research) включают сборку мозаик в более крупные фрагменты ($5 \times 5^\circ$, а не $1 \times 1^\circ$ как в двух первых версиях) (рис. 1) и поставляются в формате GeoTIFF (Geo Tagged Image File Format). В рамках данного исследования использованы данные SRTM последней версии.

Данные представляют собой простой 16 битный растр, значение пикселя является высотой над уровнем моря в данной точке. Используется система координат WGS84 (World Geodetic System 1984).

По оценкам ряда авторов [12] матрица SRTM имеет ошибку, которая составляет в среднем для равнинной территории 2,9 м и 5,4 м для холмистой местности, значительная часть этих данных включает систематическую ошибку. Согласно их выводам матрица SRTM подходит для создания горизонталей на топографических картах масштаба 1:50 000. Что позволяет использовать эти данные на предварительной стадии водохозяйственного проектирования. При учете систематической ошибки возможно повышение точности матрицы SRTM и ее использование при создании картографических произведений масштаба 1:25 000 на районы с равнинным и всхолмленным рельефом [2], что позволит использовать данные SRTM и на более поздних стадиях проектирования водохранилищ.

Методы исследования

Файлы данных SRTM, представляющие собой матрицу значений, могут быть импортированы в различные программы построения карт и геоинформационные системы (ГИС).

Основу программного обеспечения в рамках заданного исследования составил пакет программ MicroDEM [11]. Программное обеспечение MicroDEM распространяется бесплатно и представляет собой простое и эффективное средство для доступа, визуализации и анализа пространственных данных. В пакете программ MicroDEM реализован экспорт выбранной области файла в формате GeoTIFF в файл реляционной базы геоданных, с последующей возможностью построения запросов, применения средств статистической обработки рядов данных, процедур фильтрации по отметкам, широте и долготе и т. д.

При расчете морфометрических характеристик водохранилищ за основу были взяты проектные величины напора, а также значения полезного объема для каждой из рассматриваемых ГЭС [10].

Важным при проектировании водохозяйственных объектов является выявление соответствия объемов и площадей определенным уровням водохранилища, которое определяется батиграфическими зависимостями.

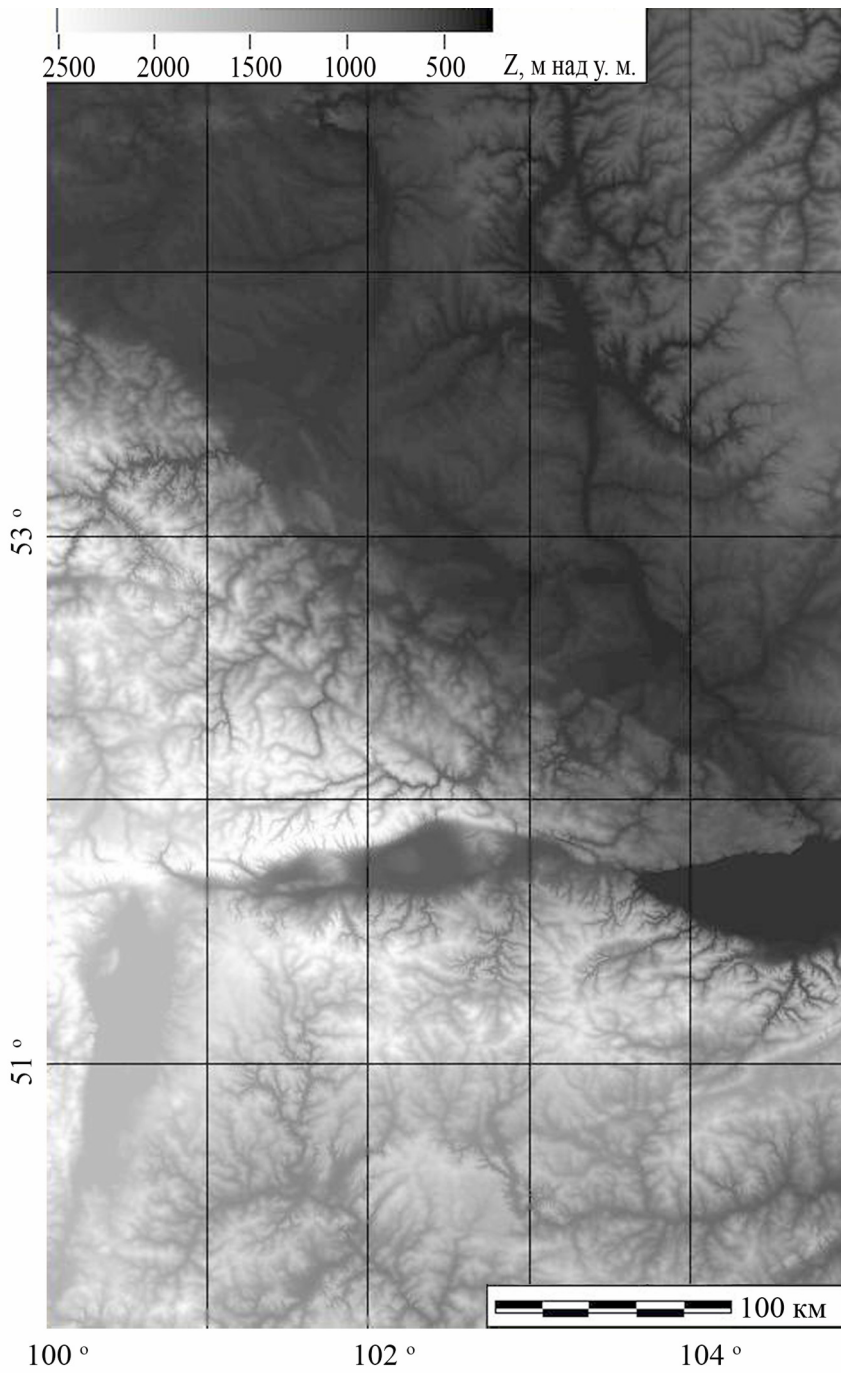


Рис. 1. Визуализация данных радарной съемки SRTM средствами пакета программ MicroDEM

Ключевым моментом использования цифровых моделей рельефа в рамках данного исследования служит отсутствие трудоемкой процедуры определения площадей зеркала путем планиметрирования горизонталей на топографических картах. Площади зеркала водохранилища Ω_i при заданном наполнении Z_i определялись как:

$$\Omega_i = \omega n_i, \quad (1)$$

где ω – площадь пикселя, млн м²; n_i – число пикселей в долине реки выше створа проектируемой ГЭС, в которых отметка земной поверхности не превышает текущую отметку зеркала водохранилища Z_i . Расчет n_i осуществлялся средствами статистического анализа, реализованного в пакете программ MicroDEM.

Ординаты кривой $W = W(Z)$ рассчитываются путем последовательного суммирования объемов ΔW_i , определяемых по выражению:

$$\Delta W_i = 0,5(\Omega_i + \Omega_{i+1})(Z_{i+1} - Z_i), \quad (2)$$

где ΔW_i – объем водохранилища, в слое между горизонталями Z_i и Z_{i+1} , млн м³; Ω_i и Ω_{i+1} – площади зеркала водохранилища соответственно при высотных отметках Z_i и Z_{i+1} соответственно, млн м². Так как кривая $W = W(Z)$ рассчитана для условий горизонтальности уровня водохранилища, т. е. отвечает гидростатическому равновесию неподвижной жидкости, она носит название статической кривой объемов водохранилища.

Также важными характеристиками водохранилища являются его средняя глубина и критерий литорали (мелководья) при различном наполнении водохранилища. Из-за неправильного выбора подпорных уровней водохранилищ на ряде водохранилищ появляются мелководья, в результате чего происходят неблагоприятные гидробиологические и гидрохимические процессы, влекущие за собой цветение воды и ухудшение в связи с этим санитарного состояния водоема [1]. Во избежание прогрева воды, зарастания водохранилищ и ухудшения гидрохимического и гидробиологического режимов в них средняя глубина при уровне мертвого объема (УМО) должна быть не менее 2,0–2,5 м, а площадь мелководий с глубинами менее 2 м – не более 30 % площади водохранилища, т. е. критерий литорали должен быть $L_{\Omega, \text{УМО}} \leq 0,3$ [5].

Для расчета критерия литорали использовалась формула:

$$L_{\Omega_i} = \frac{\Omega_i - \Omega_{i-2}}{\Omega_i}, \quad (3)$$

где L_{Ω} – безразмерный критерий литорали; Ω_i и Ω_{i-2} – площади зеркала водохранилища при высотных отметках уровня Z_i и Z_{i-2} соответственно, млн м².

Средняя глубина h_{cp_i} определяется как отношение объема водохранилища W_i к площади его зеркала Ω_i при одном и том же наполнении водохранилища Z_i :

$$h_{cp_i} = \frac{W_i}{\Omega_i}. \quad (4)$$

Основные результаты

В результате работы по данным SRTM определены значения площадей, объемов, средних глубин и критерия литорали при различном наполнении водохранилища и построены кривые соответствующих зависимостей для водохранилища Суховской (рис. 2) и Тельминской ГЭС (рис. 3). Все высотные отметки в работе приведены в системе WGS84.

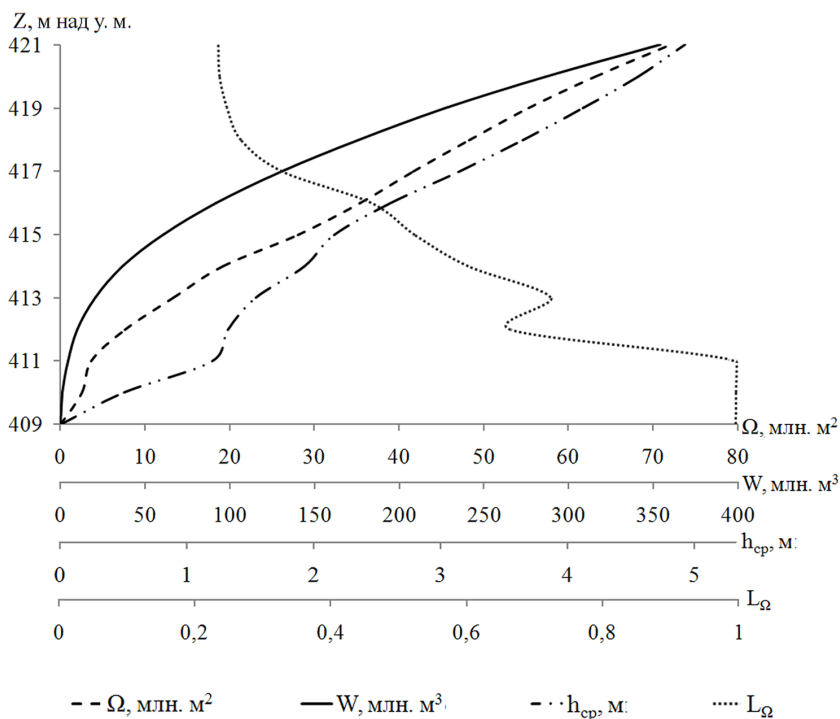


Рис. 2. Батиграфические кривые для водохранилища Суховской ГЭС

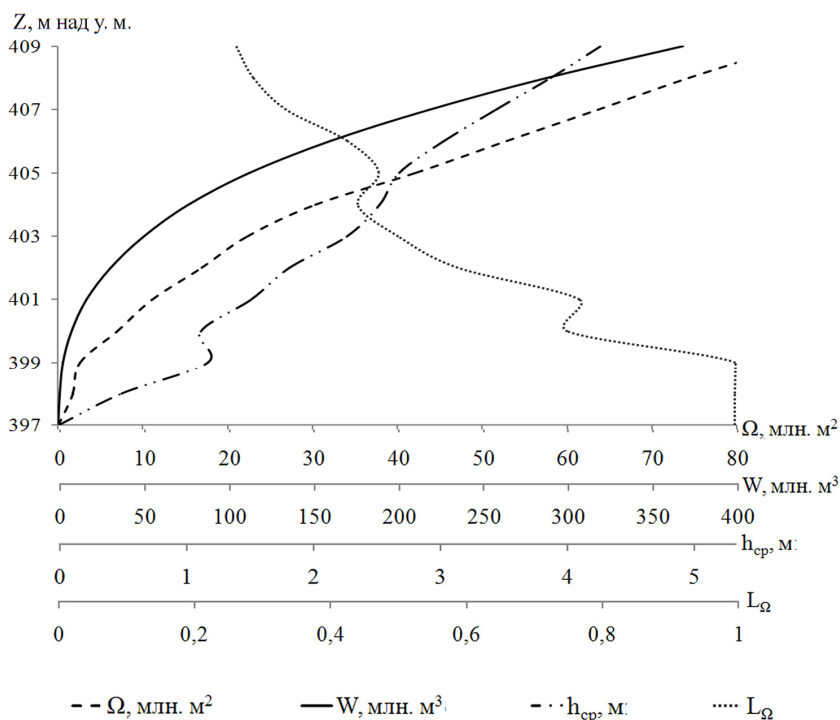


Рис. 3. Батиграфические кривые для водохранилища Тельминской ГЭС

Кроме того, в рамках данного исследования на основании использования цифровой модели рельефа определены границы территорий техногенного затопления, что является необходимым при разработке проектов водохозяйственных объектов различного назначения [7]. Было учтено, что отрицательное влияние затопления проектируемыми водохранилищами надлежит оценивать в зависимости от режимов сработки водохранилища и продолжительности действия затопления на прибрежную территорию. При этом следует различать: постоянное затопление – ниже отметки уровня мертвого объема (УМО); периодическое – между отметками нормального подпорного уровня (НПУ) и УМО; временное (форсирование уровня водохранилища выше НПУ).

Границы территорий техногенного затопления водохранилищами Суховской и Тельминской ГЭС при НПУ показаны на рис. 4 и 5 соответственно.

Подобные карты-схемы могут быть использованы при определении ущерба в результате создания водохранилищ.

Также для каждого из рассматриваемых водохранилищ в ходе исследования на основании батиграфических кривых определены:

- полный объем, который складывается из мертвого и полезного объемов, соответствует отметке НПУ в верхнем бьефе и поддерживается при нормальных условиях эксплуатации гидроузла;

– мертвый объем – постоянная часть полного объема водохранилища, которая в нормальных условиях эксплуатации не сбрасывается и в регулировании стока не участвует.

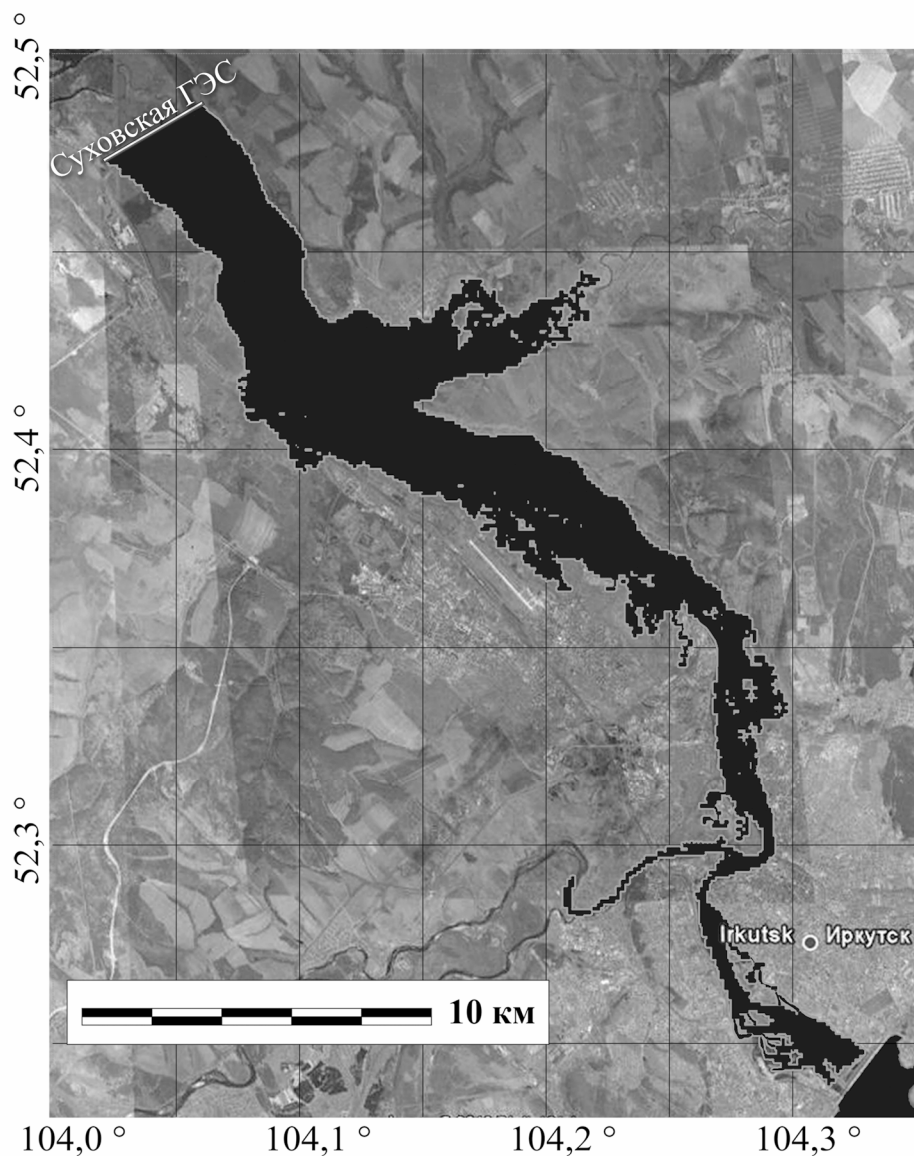


Рис. 4. Карта-схема проектируемого водохранилища Суховской ГЭС при НПУ

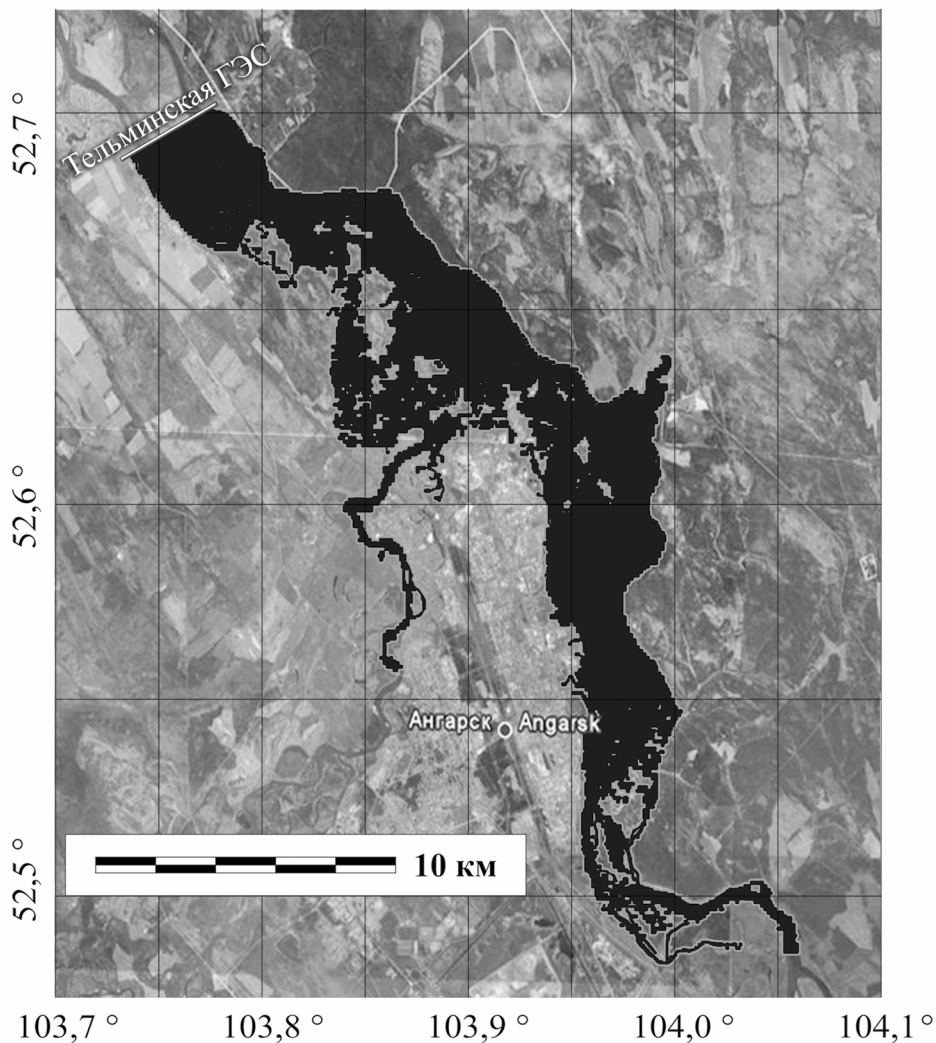


Рис. 5. Карта-схема проектируемого водохранилища Тельминской ГЭС при НПУ

Необходимая в расчетах величина полезного объема водохранилища, т. е. объема, заключенного в слое водохранилища между НПУ и УМО и предназначенного для непосредственного регулирования стока, как было отмечено выше, взята из проектной документации [10].

Значения ключевых характеристик водохранилищ, определенных в ходе исследования с применением цифровой модели рельефа, построенной на основе данных SRTM, приведены в табл.

Таблица

Параметры водохранилищ Суховской и Тельминской ГЭС

Параметры	Водоохранилище Суховской ГЭС	Водоохранилище Тельминской ГЭС
Нормальный подпорный уровень, м над у. м.	421,0	409,0
Уровень мертвого объема, м над у. м.	420,1	408,7
Глубина сработки водохранилища, м	0,9	0,3
Средняя глубина водохранилища при УМО, м	4,6	4,2
Средняя глубина водохранилища при НПУ, м	4,9	4,3
Полный объем водохранилища, млн м ³	354	368
Полезный объем водохранилища, млн м ³	60	30
Мертвый объем водохранилища, млн м ³	294	338
Площадь зеркала водохранилища при НПУ, млн м ²	72,0	86,3
Площадь зеркала водохранилища при УМО, млн м ²	64,2	82,8
Площадь мелководий при УМО, млн м ²	15,1	22,4
Площадь мелководий при НПУ, млн м ²	16,8	22,7

Выводы

Для решения прикладных задач в области проектирования и строительства различных гидротехнических сооружений и для оценки и рационального использования водных ресурсов еще на стадии проектирования водохранилищ необходимо иметь достаточно полные сведения о морфометрических характеристиках проектируемых водохозяйственных объектов.

В данной работе была собрана имеющаяся информация по точности данных SRTM и проанализирована возможность их применения к оценке морфометрических характеристик проектируемых водохранилищ, а также на примере водохранилищ низконапорных Суховской и Тельминской ГЭС изложен опыт автора по применению цифровой модели рельефа и ГИС-технологий для решения прикладных задач водохозяйственного проектирования.

В нашей стране пока еще не разработана нормативная база по применению цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования при проектировании водохранилищ, поэтому разработка методики их использованию в морфометрических работах и водохозяйственных расчетах является своевременной и полезной.

Полученные в работе значения характерных объемов водохранилищ хорошо согласуются с их оценками, полученными в ходе разработки проектов Суховской и Тельминской ГЭС [10]. Незначительная разница в значениях площадей водохранилищ при НПУ может объясняться как возможным отклонением положения створов ГЭС по отношению к проектному, так и проблемами, обусловленными сравнительно большой высотой сечения рельефа и возникающими при определении характерных площадей водохранилищ низконапорных ГЭС традиционными способом.

Кроме этого в работе была проведена оценка параметров водохранилищ, связанных с современными санитарно-техническими требованиями [5], и было выявлено, что оба водохранилища соответствуют условиям поддержания необходимого качества воды, с точки зрения обеспечения достаточных глубин при УМО и площадей мелководий не более 30 % площади водохранилища. Однако необходимо учитывать, что в обоих случаях площадь мелководий должна увеличиться в процессе эксплуатации водохранилищ в связи с явлением «переработки берегов», интенсивность которого должна рассчитываться в ходе отдельного исследования.

Таким образом, в ходе исследования на примере Суховской и Тельминской ГЭС подтвердилось, что использование данных SRTM и ГИС-технологий позволяет существенно сократить объем работ по определению характеристик водохранилищ и делает возможным оценивать все необходимые при проектировании водохозяйственных объектов морфометрические параметры.

Список литературы

1. *Арсеньев Г. С.* Основы управления гидрологическими процессами: водные ресурсы : учебник / Г. С. Арсеньев. – СПб. : РГГМУ, 2005. – 231 с.
2. *Карионов Ю. И.* Оценка точности матрицы SRTM / Ю. И. Карионов // Геопрофи. – 2010. – № 1. – С. 48–51.
3. Картоведение : учеб. для вузов / А. М. Берлянт [и др.] ; под ред. А. М. Берлянта. – М. : Аспект Пресс, 2003. – 477 с.
4. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<http://www.complexdoc.ru/ntdtext/538635/515.10.2010>]
5. *Мусохранов В. Е.* Основы рационального природопользования: лесное хозяйство, водное хозяйство, регулирование речного стока : учеб. пособие : в 3 ч. / В. Е. Мусохранов, Т. Н. Жачкина. – Барнаул : Изд-во АГАУ, 2007. – Ч. 3. – 255 с.
6. *Погорелов А. В.* О расчете некоторых морфометрических показателей земной поверхности в бассейне р. Кубани по данным спутниковых снимков / А. В. Погорелов, Ж. А. Думит, Е. В. Куркина // Вестн. Сев.-Кавказ. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 4 (17). – С. 10–16.
7. СНИП 2.06.15-85. Инженерная защита территории от затопления и подтопления [Электронный ресурс]. – URL: <http://cert.obninsk.ru/gost/1494/1494.html> (дата обращения: 05.10.2010).
8. Создание цифровой модели рельефа на территорию республики Саха (Якутия) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.geoconsulting.ru/DEM.htm> (дата обращения: 30.09.2010).
9. *Стулень А. А.* Энергоэффективность каскада ГЭС на р. Иркут / А. А. Стулень, Н. А. Мурашко // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 26–30 апреля 2010 г.). – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2010. – С. 301–305.
10. *Суходолов А. А.* Электроэнергетика Иркутской области / А. А. Суходолов // Наука в Сибири. – Иркутск, 1998. – № 5–6 (2141–2142). – С. 8–9.
11. *Guth P. L.* Geomorphometry in MICRODEM // Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in soil science series. – Elsevier, 2008. – P. 351–366.

12. Karwel A. K. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland / A. K. Karwel, I. Ewiak // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2008. – Vol. XXXVII, part B7. – P. 169–172.

13. The shuttle radar topography mission / Farr T. G. [et al.] // CEOS SAR Workshop. (Toulouse 26–29 Oct. 1999). – Noordwijk, 2000. – P. 361–363.

The artificial water bodies morphometric characteristics estimation with remote sensing data (by the sample of Sukhovskaya and Tel'minskaya hydro power stations reservoirs)

E. N. Sutyryna

Annotation. The results of the SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) digital elevation model applying to the reservoir morphometric characteristics estimation are presented in this paper.

Key words: digital elevation model, SRTM data, morphometric characteristics, artificial reservoir.

*Сутырина Екатерина Николаевна
кандидат географических наук
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
доцент
тел.: (3952) 52-10-72*