



Серия «Науки о Земле»
2014. Т. 10. С. 101–114
Онлайн-доступ к журналу:
<http://isu.ru/izvestia>

ИЗВЕСТИЯ
*Иркутского
государственного
университета*

УДК 528.88; 551.4; 627.8

Определение морфометрических характеристик проектируемых и строящихся водохранилищ Ангарского каскада ГЭС по данным дистанционного зондирования

Е. Н. Сутырина (ensut@rambler.ru)

Аннотация. Собрана имеющаяся информация по точности данных SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) и проанализирована возможность их применения к оценке морфометрических характеристик строящихся и проектируемых водохранилищ. На примере водохранилищ Суховской, Тельминской, Богучанской и Мотыгинской ГЭС изложен опыт автора по применению цифровой модели рельефа и ГИС-технологий для решения прикладных задач водохозяйственного проектирования.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, данные SRTM, морфометрические характеристики, батиграфические кривые, водохранилища.

Введение

Для решения прикладных задач в области проектирования и строительства различных водохозяйственных 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 [1]. Определение морфометрических характеристик водохранилища путем планиметрирования горизонталей на топографических картах является одним из трудоемких этапов при проектировании водохранилищ. 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 [4]) на топографических картах масштаба от 1:10 000 до 1:50 000, рекомендуемых к использованию при оценке морфометрических параметров водохранилищ [5], делает затруднительным их применение как при изучении проектов низконапорных ГЭС, так и при оценке ряда параметров, таких как критерий литорали, требующих меньшее значение шага дискретизации высотных отметок.

В настоящее время в различные морфометрические исследования активно вовлекаются цифровые модели рельефа. В рамках данного исследо-

вания на примере водохранилищ проектируемых и строящихся ГЭС Ангарского каскада (Суховской, Тельминской, Богучанской и Мотыгинской ГЭС) 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 [9].

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 [8] вновь поднимается вопрос о пересмотре ранее неактуальных проектов строительства дополнительных ГЭС на территории Иркутской области.

Богучанская ГЭС – строящаяся гидроэлектростанция на р. Ангаре, у г. Кодинска Кежемского района Красноярского края в 444 км от устья реки. Входит в Ангарский каскад ГЭС и является его четвертой ступенью. Строительство Богучанской ГЭС ведется с 1974 г. Заполнение водохранилища началось весной 2012 г. Богучанская ГЭС выйдет на полную проектную мощность 3000 МВт после заполнения водохранилища до отметки НПУ (нормального подпорного уровня) 208 м над у. м. [2].

Мотыгинская ГЭС – ГЭС, проектируемая в нижнем течении р. Ангары, в Мотыгинском районе Красноярского края, вблизи пос. Мотыгино, как пятая ступень Ангарского каскада. В рамках проведения работ по обоснованию инвестиций рассматривались три варианта размещения створа плотины Мотыгинской ГЭС в районе о. Поликарпов: в 152,9; 151,6; 149,98 км от устья р. Ангары, соответственно створы 1, 2, 3. Анализ результатов инженерно-геологических изысканий показал, что с учетом инженерно-геологических условий вариант створа выглядит наиболее предпочтительным [6]. В соответствии с имеющимися проработками на стадии обоснования инвестиций в строительство Мотыгинского гидроузла рассматривались варианты НПУ: 123,0; 125,0; 127,0 и 129,0 м над у. м., с установленной мощностью от 830 до 1308 МВт [6].

Материалы и методы

В ходе работы в качестве исходных материалов для оценки морфометрических параметров водохранилищ Суховской, Тельминской, Богучанской и Мотыгинской ГЭС использовались данные радарной топографической съемки поверхности SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), произведенной методом радарной интерферометрии с борта космического корабля многоразового использования «Шаттл». 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 ТБ 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.

В рамках данного исследования использованы данные SRTM последней, 4-й версии с исправленными областями, производимые CGIAR (Consultative Group for International Agriculture Research), предоставляемые в формате GeoTIFF фрагментами 5×5° и представляющие собой простой 16-битный растр, значение пикселя в котором является высотой над уровнем моря в данной точке.

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 ГИС MicroDEM [10]. Программное обеспечение MicroDEM распространяется бесплатно и представляет собой простое и эффективное средство для доступа, визуализации и анализа пространственных данных. В ГИС 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.

По оценкам ряда авторов [11], 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, что в том числе было использовано и в рамках данной работы, возможно повышение точности матрицы SRTM и ее использование при создании картографических произведений масштаба 1:25 000 на районы с равнинным и всхолмленным рельефом [3]. Это дает возможность применять данные SRTM и на более поздних ста-

дях проектирования водохранилищ. В ходе настоящего исследования систематическая ошибка учитывалась на основе сопоставления значений высотных отметок опорных точек по данным SRTM и топографическим материалам.

Основные результаты

При расчете морфометрических характеристик водохранилищ за основу были взяты положения створов, величины напора и/или отметки уровня мертвого объема (УМО) и НПУ для каждой из рассматриваемых ГЭС по материалам проектной документации и предпроектных изысканий [2; 6; 9].

Важным при проектировании водохозяйственных объектов является выявление соответствия объемов и площадей определенным уровням водохранилища, которое определяется батиграфическими зависимостями. С использованием средств ГИС MicroDEM по данным SRTM определены значения площадей Ω , объемов W , средних глубин h_{cp} и критерия литорали L_{Ω} при различном наполнении водохранилища Z и построены батиграфические кривые соответствующих зависимостей для водохранилищ Суховской (рис. 1), Тельминской (рис. 2), Богучанской (рис. 3) и Мотыгинской ГЭС (рис. 4).

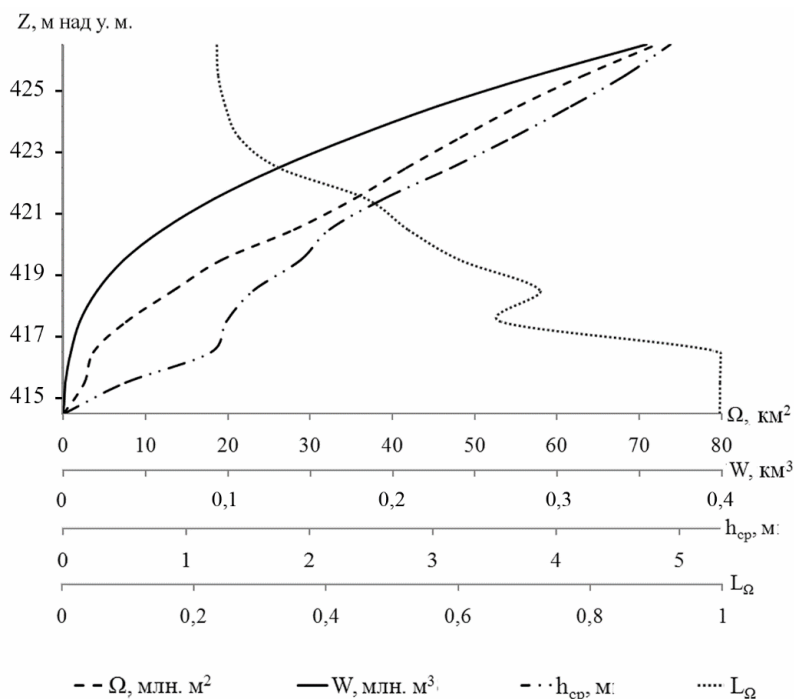


Рис. 1. Батиграфические кривые для водохранилища Суховской ГЭС

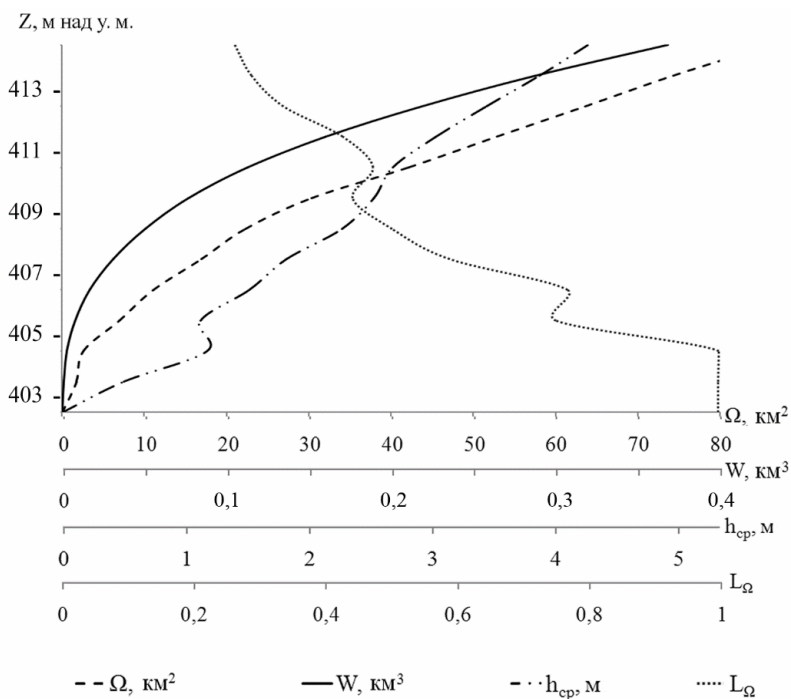


Рис. 2. Батиграфические кривые для водохранилища Тельминской ГЭС

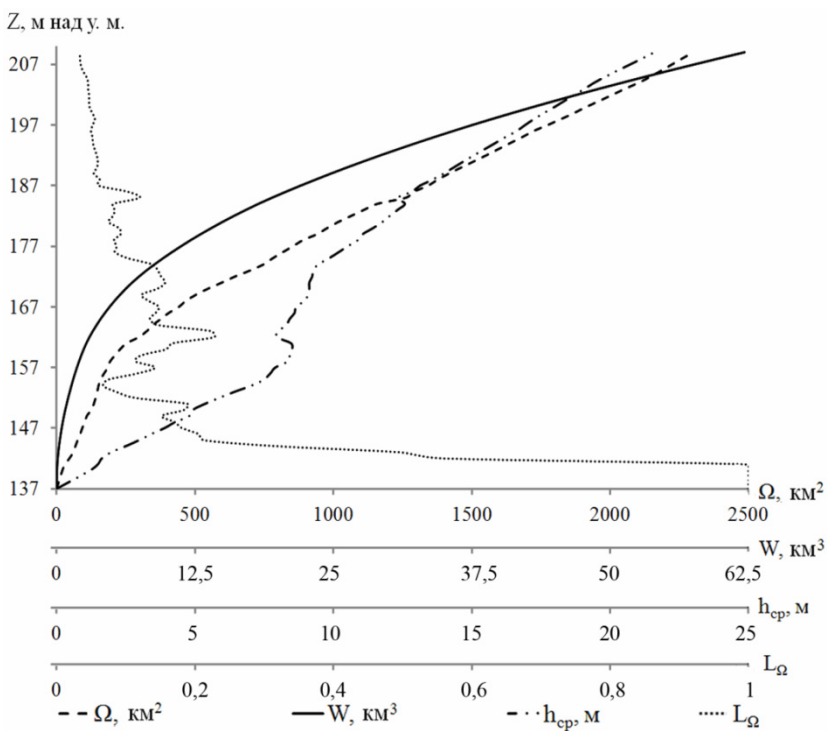


Рис. 3. Батиграфические кривые для водохранилища Богучанской ГЭС

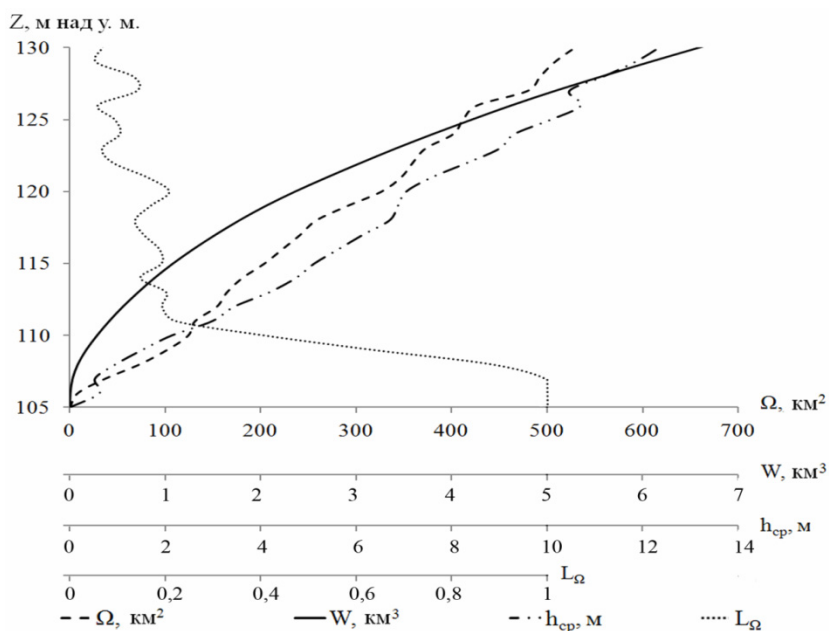


Рис. 4. Батиграфические кривые для водохранилища Мотыгинской ГЭС (створ 3)

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 (СНиП 2.06.15-85, 1984). При этом было учтено, что отрицательное влияние затопления проектируемыми водохранилищами надлежит оценивать в зависимости от режимов сработки водохранилища и продолжительности действия затопления на прибрежную территорию. Однако следует различать: постоянное затопление – ниже отметки УМО; периодическое – между отметками НПУ и УМО; временное – форсирование уровня водохранилища выше НПУ. Определенные по данным SRTM границы территорий техногенного затопления водохранилищами Суховской, Тельминской, Богучанской и Мотыгинской ГЭС при НПУ показаны на рис. 5, 7, 9, 11 соответственно. На рисунках 6, 8, 10, 12 приведены соответствующие территории до момента затопления. Подобные карты-схемы могут быть использованы при определении ущерба в результате создания водохранилищ.

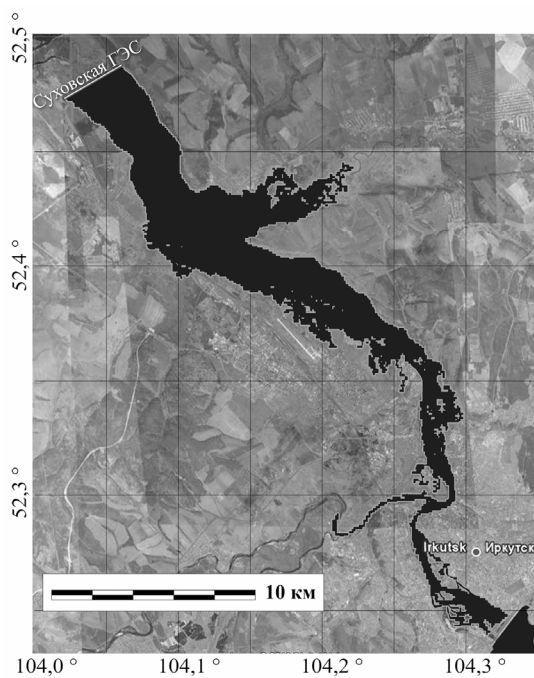


Рис. 5. Карта-схема проектируемого водохранилища Суховской ГЭС при НПУ по материалам SRTM

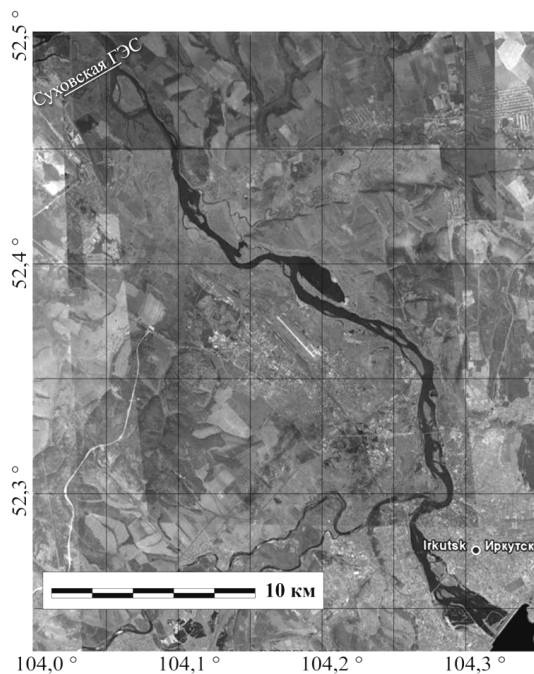


Рис. 6. Карта-схема участка р. Ангары до затопления проектируемым водохранилищем Суховской ГЭС

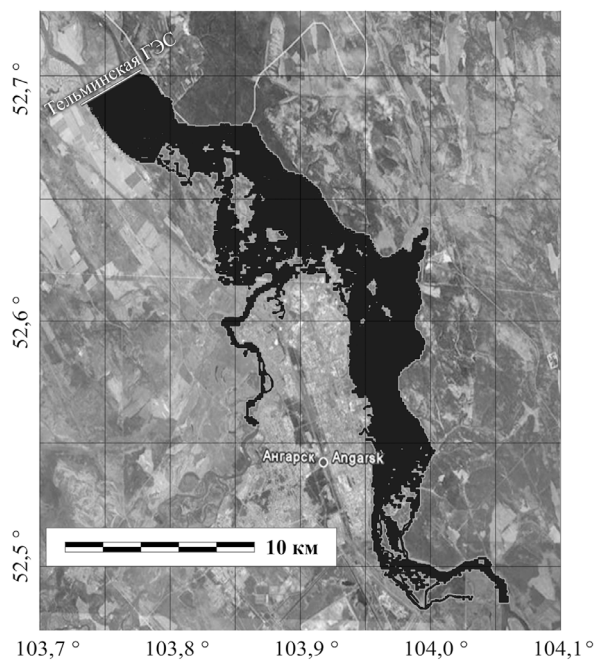


Рис. 7. Карта-схема проектируемого водохранилища Тельминской ГЭС при НПУ по материалам SRTM

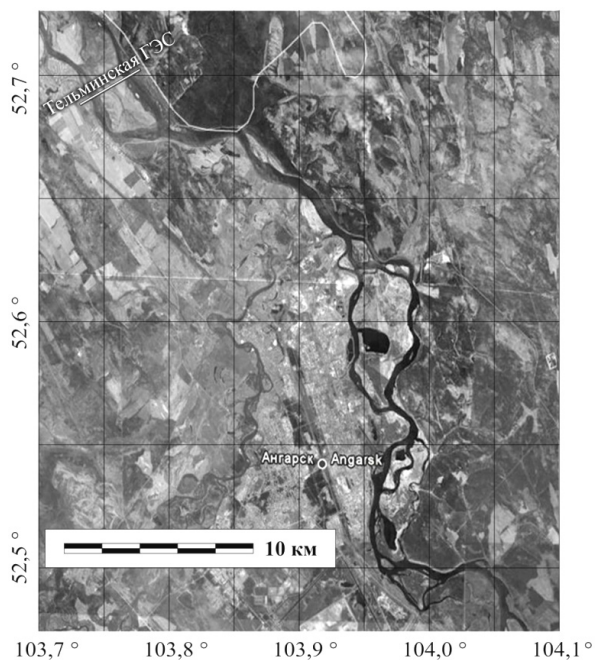


Рис. 8. Карта-схема участка р. Ангары до затопления проектируемым водохранилищем Тельминской ГЭС

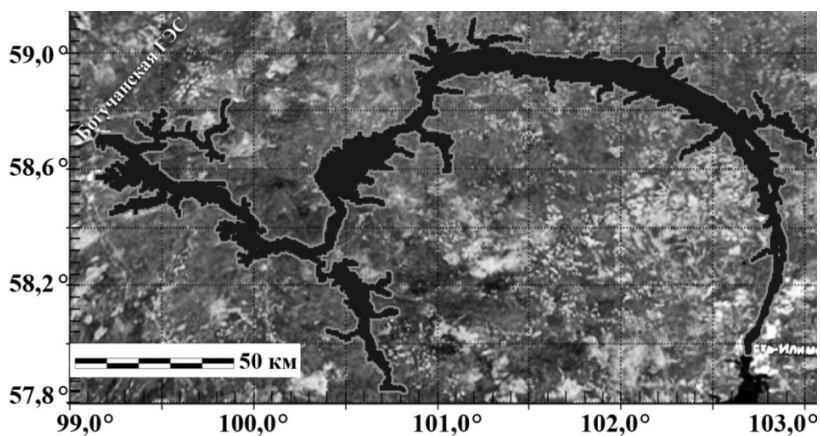


Рис. 9. Карта-схема водохранилища Богучанской ГЭС при НПУ по материалам SRTM

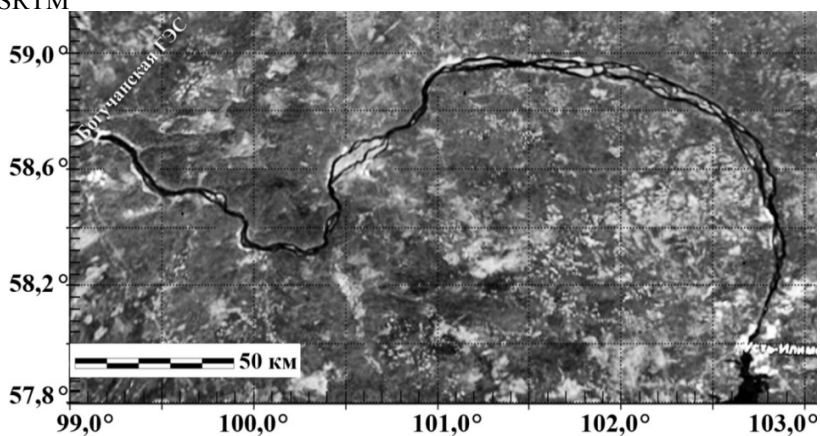


Рис. 10. Карта-схема участка р. Ангары до затопления водохранилищем Богучанской ГЭС

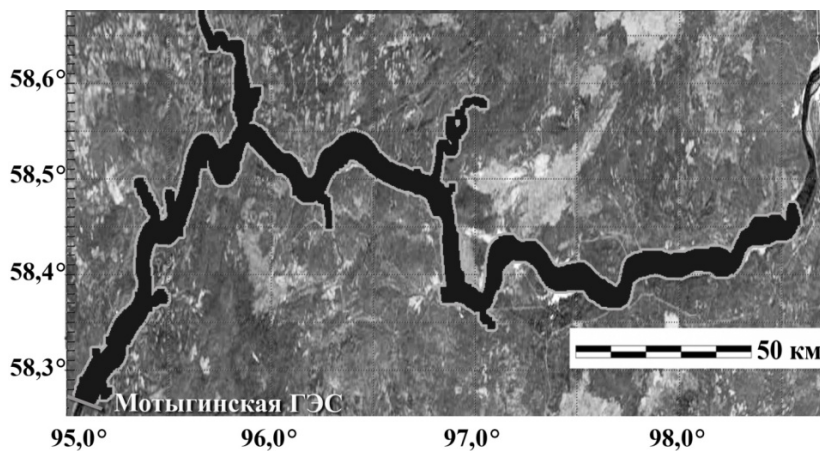


Рис. 11. Карта-схема водохранилища Мотыгинской ГЭС (створ 3) по материалам SRTM при варианте НПУ 129 м над у. м.

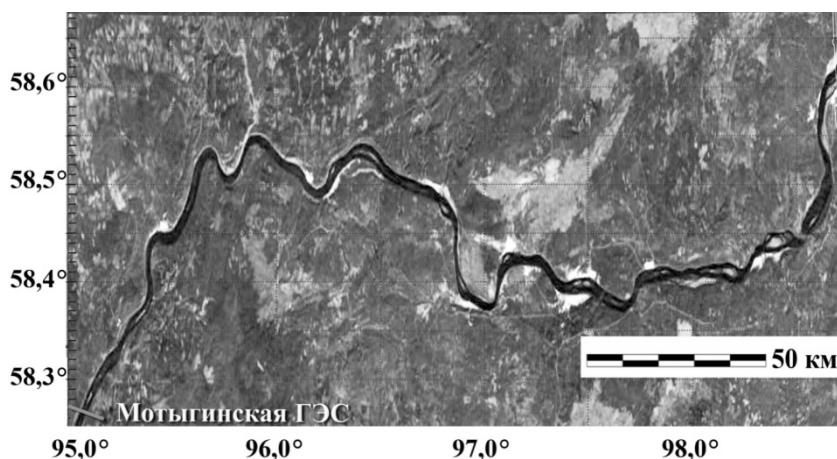


Рис. 12. Карта-схема участка р. Ангары до затопления проектируемым водохранилищем Мотыгинской ГЭС

Значения ключевых характеристик водохранилищ, определенных в ходе исследования с применением цифровой модели рельефа, построенной на основе данных SRTM, приведены ниже в табл. 1, 2, 3, 4 в соотношении с материалами проектных и предпроектных изысканий [2; 6; 9]. Необходимо отдельно отметить, что для Суховской и Тельминской ГЭС, в отличие от Богучанской и Мотыгинской ГЭС, известно только ориентировочное местоположение створов проектируемых плотин [9], что может дополнительно вносить отличия по отношению к результатам предварительных изысканий [9].

Таблица 1

Параметры водохранилища Суховской ГЭС

Параметры	По материалам SRTM	По предварительным изысканиям
Нормальный подпорный уровень, м над у. м.	426,5	—*
Уровень мертвого объема, м над у. м.	425,6	—
Глубина сработки водохранилища, м	0,9	—
Средняя глубина водохранилища при УМО, м	4,6	—
Средняя глубина водохранилища при НПУ, м	4,9	—
Объем водохранилища при НПУ, км ³	0,35	0,40
Объем водохранилища при УМО, км ³	0,29	—
Площадь зеркала водохранилища при УМО, км ²	64,2	—
Площадь зеркала водохранилища при НПУ, км ²	72,0	63,0
Площадь мелководий при УМО, км ²	15,1	—
Площадь мелководий при НПУ, км ²	16,8	—

* *Примечание:* здесь и далее в табл. 1, 2, 3, 4 параметры не определялись или автору не известны.

Таблица 2

Параметры водохранилища Тельминской ГЭС

Параметры	По материалам SRTM	По предварительным изысканиям
Нормальный подпорный уровень, м над у. м.	414,5	–
Уровень мертвого объема, м над у. м.	414,2	–
Глубина сработки водохранилища, м	0,3	–
Средняя глубина водохранилища при УМО, м	4,2	–
Средняя глубина водохранилища при НПУ, м	4,3	–
Объем водохранилища при НПУ, км ³	0,37	0,40
Объем водохранилища при УМО, км ³	0,34	–
Площадь зеркала водохранилища при УМО, км ²	82,8	–
Площадь зеркала водохранилища при НПУ, км ²	86,3	91,0
Площадь мелководий при УМО, км ²	22,4	–
Площадь мелководий при НПУ, км ²	22,7	–

Таблица 3

Параметры водохранилища Богучанской ГЭС

Параметры	По материалам SRTM	По проекту
Нормальный подпорный уровень, м над у. м.	208	
Уровень мертвого объема, м над у. м.	207	
Глубина сработки водохранилища, м	1	
Средняя глубина водохранилища при УМО, м	25,9	–
Средняя глубина водохранилища при НПУ, м	26,5	25,0
Объем водохранилища при НПУ, км ³	59,90	58,2
Объем водохранилища при УМО, км ³	57,60	55,9
Площадь зеркала водохранилища при УМО, км ²	2224,0	–
Площадь зеркала водохранилища при НПУ, км ²	2261,8	2326,0
Площадь мелководий при УМО, км ²	77,1	–
Площадь мелководий при НПУ, км ²	75,8	–

Полученные по данным SRTM параметры водохранилищ Богучанской и Мотыгинской ГЭС, для которых имеется подробная информация о положении створов, величинах НПУ и УМО и т. д., показали незначительное отличие от проектных данных. Так, среднее отклонение в оценках площадных характеристик этих водохранилищ от проектных составляет 1,1 %. Среднее отклонение объемных характеристик составляет 2,2 %, среднее отклонение в оценках средних глубин составляет 2,4 %. Это подтверждает возможность использования данных SRTM при проектировании крупных водохранилищ и обосновании их параметров, по крайней мере на предварительных стадиях проектирования.

Таблица 4

Параметры водохранилища Мотыгинской ГЭС

Параметры	Вариант расположения створа	По материалам SRTM		По изысканиям на стадии обоснования инвестиций		По материалам SRTM		По изысканиям на стадии обоснования инвестиций	
		По материалам SRTM	По изысканиям на стадии обоснования инвестиций	По материалам SRTM	По изысканиям на стадии обоснования инвестиций	По материалам SRTM	По изысканиям на стадии обоснования инвестиций		
Нормальный подпорный уровень, м над у. м.	1	123		125		127		129	
	2								
	3								
Уровень мертвого объема, м над у. м.	1	122,5		124,5		126,5		128,5	
	2								
	3								
Глубина сработки водохранилища, м	1	0,5		0,5		0,5		0,5	
	2								
	3								
Средняя глубина водохранилища при УМО, м	1	8,6	–	9,7	–	10,6	–	11,5	–
	2	8,7	–	9,7	–	10,6	–	11,5	–
	3	8,8	–	9,8	–	10,7	–	11,6	–
Средняя глубина водохранилища при НПУ, м	1	9,0	9,3	10,1	10,1	10,4	11,0	11,8	12,1
	2	9,0	9,2	10,1	10,0	10,5	10,9	11,8	12,0
	3	9,2	9,1	10,2	9,9	10,6	10,8	11,9	11,9
Объем водохранилища при НПУ, км ³	1	3,25	3,34	4,02	4,05	4,87	5,04	5,83	6,03
	2	3,27	3,34	4,04	4,05	4,89	5,04	5,85	6,03
	3	3,41	3,34	4,21	4,05	5,08	5,04	6,06	6,03
Объем водохранилища при УМО, км ³	1	3,08	3,11	3,83	3,81	4,65	4,79	5,60	5,77
	2	3,10	3,11	3,84	3,81	4,67	4,79	5,62	5,77
	3	3,23	3,11	4,00	3,81	4,85	4,79	5,81	5,77
Площадь зеркала водохранилища при УМО, км ²	1	355,2	–	395,0	–	440,1	–	485,9	–
	2	356,2	–	396,1	–	441,3	–	487,1	–
	3	365,9	–	406,7	–	453,1	–	500,2	–
Площадь зеркала водохранилища при НПУ, км ²	1	361,7	360,6	400,6	399,8	458,7	466,1	498,0	493,2
	2	362,8	364,2	404,4	400,9	462,6	467,2	502,0	494,4
	3	372,6	368,3	408,7	411,7	467,1	479,4	506,7	507,7
Площадь мелководий при УМО, км ²	1	28,3	–	39,8	–	45,1	–	45,8	–
	2	28,3	–	39,8	–	45,2	–	45,8	–
	3	29,1	–	40,8	–	46,5	–	47,0	–
Площадь мелководий при НПУ, км ²	1	24,6	–	38,1	–	66,3	–	27,1	–
	2	24,6	–	38,1	–	66,4	–	27,2	–
	3	25,5	–	39,1	–	67,7	–	28,3	–

Для Суховской и Тельминской ГЭС имеется неполная информация, что вносит заметный вклад в расхождение данных, полученных в ходе настоящего исследования, с результатами изысканий, выполненных ранее. Так, среднее отклонение значений площадных характеристик, определен-

ных для водохранилищ этих ГЭС, составляет 9,7 %, объемных – 10,4 %. Кроме этого, данные об объемных характеристиках в опубликованных материалах проведенных ранее изысканий округлены до одной значащей цифры [9]. Если производить сопоставление значений объемных характеристик, имеющих одинаковое округление, то различия значений объемных параметров не будет.

В работе была проведена оценка параметров водохранилищ, связанных с современными санитарно-техническими требованиями, и было выявлено, что по данным SRTM все рассматриваемые 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 во всех случаях площадь мелководий должна увеличиться в процессе эксплуатации водохранилищ. Это связано с формированием таких морфологических элементов, как береговая отмель, в результате процесса перестроения или «переработки» берегов водохранилищ, интенсивность которого может быть рассчитана в ходе отдельного исследования.

Выводы

Исследование показало, что использование данных цифровых моделей рельефа на основе данных SRTM и ГИС-технологий позволяет существенно сократить объем работ по определению характеристик водохранилищ и дает возможность оценивать все необходимые при проектировании водохозяйственных объектов морфометрические параметры, поэтому разработка методики по использованию данных SRTM в морфометрических работах и водохозяйственных расчетах с оценкой их точности являются своевременными и актуальными.

Полученные в работе значения характерных объемов водохранилищ хорошо согласуются с их оценками, полученными в ходе разработки проектов Богучанской и Мотыгинской ГЭС. Различие в значениях площадей и объемов водохранилищ Суховской и Тельминской ГЭС может объясняться как возможным отклонением положения створов ГЭС по отношению к проектному, округлением данных об объемах в опубликованных материалах изысканий, так и проблемами, обусловленными сравнительно большой высотой сечения рельефа при исходных расчетах и возникающими при определении характерных площадей водохранилищ низконапорных ГЭС традиционным способом.

Список литературы

1. Арсеньев Г. С. Основы управления гидрологическими процессами: водные ресурсы : учебник / Г. С. Арсеньев. – СПб. : РГГМУ, 2005. – 231 с.
2. Богучанская ГЭС [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.boges.ru>.
3. Карионов Ю. И. Оценка точности матрицы SRTM // Геопрофи. – 2010. – № 1. – С. 48–51.
4. Картоведение : учебник / А. М. Берлянт [и др.] ; под ред. А. М. Берлянта. – М. : Аспект Пресс, 2003. – 477 с.

5. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.complexdoc.ru/ntdtext/538635/5>.
6. Мотыгинская ГЭС на р. Ангаре. Обоснование инвестиций в строительство Мотыгинской ГЭС на р. Ангаре. Оценка воздействия строительства гидроузла на окружающую среду / отв. исполнитель А. А. Ямских. – Красноярск, 2009. – Кн. 3. – 107 с.
7. СНИП 2.06.15-85. Инженерная защита территории от затопления и подтопления [Электронный ресурс]. – URL: <http://cert.obninsk.ru/gost/1494/1494.html>.
8. 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 апр. 2010 г.). – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2010. – С. 301–305.
9. Суходолов А. А. Электроэнергетика Иркутской области // Наука в Сибири. – Иркутск, 1998. – № 5/6 (2141–2142). – С. 8–9.
10. Guth P. L. Geomorphometry in MICRODEM // Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in soil science series. – Elsevier, 2008. – P. 351–366.
11. 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. 37, Pt. B7. – P. 169–172.

Determination of Morphometrical Characteristics of the Designed and Constructed Reservoirs Cascade of Hydro Power Stations of Angara River With Remote Sensing Data

E. N. Sutyryna

Abstract. Available information about the accuracy of SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data was collected and the possibility of their application to the assessment of morphometrical characteristics of under-construction and planned reservoirs were analyzed in this paper. The experience of the author of the application of digital elevation models and GIS-technologies for solving applied problems of water-resources development on the samples of reservoirs of Sukhovskaya, Telminskaya, Boguchanskaya and Motygininskaya Hydro Power Stations were described.

Keywords: digital elevation model, SRTM data, morphometrical characteristics, bathymographical profiles, reservoirs.

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

*Sutyryna Ekaterina Nikolaevna
Candidate of Sciences (Geography)
Associate Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 52-10-72*