

Расчет заиления Токтогульского водохранилища за время его эксплуатации (1974-2009гг.)

Одним из главных факторов в оценке динамики водных запасов и режима эксплуатации водохранилищ является изменение объема их чаш за счет заиления, переформирования берегов и просадок грунта ложа.

Методика исследования процессов заиления водохранилищ Средней Азии была заложена работами экспедиции ГГИ [1]. Изучение заиления проводится в трех направлениях: первое – это прежде всего повторные батиметрические съемки чаш водохранилищ, позволяющие получить конечные результаты заиления; второе – анализ компонентов седиментационного баланса на акватории водохранилищ; третье – получение пространственной характеристики изменения режима заиления путем проведения съемок динамики мутности, скоростей течения, фракционного и гранулометрического состава наносов и донных отложений по акватории водохранилищ.

Батиметрические съемки проводятся по закрепленным на местности створам и сводятся к промерным работам с помощью эхолота или наметкой (размеченный трос с грузом), а также нивелировкой осушенной части водохранилищ после их частичной или полной сработки.

Обработка полевых материалов заключается в построении планов и расчете кривых зависимостей объемов водоемов и площадей водного зеркала от уровня воды [1].

Данная работа была проведена с целью оценки общего объема наносов и их распределения по акватории водохранилища.

Исходные данные. В качестве исходных данных для оценки заиления водохранилища были использованы топографические карты составленные в 1960-х гг. (до создания водохранилища) масштаба 1:25 000, а также проведен ряд полевых исследований:

1. Эхолотные промеры акватории водохранилища с катера, 23-27 апреля 2008 г.
2. Точечные GPS промеры осушенного участка водохранилища от моста через р. Нарын до впадения р. Нарын в водохранилище, 14-23 мая 2008 г., 9-14 июня 2008 г.
3. Эхолотные промеры с надувной лодки и точечные GPS промеры выборочных участков по периметру водохранилища, 1-8 октября 2008 г.
4. Точечные GPS промеры, геодезические профили выборочных участков по периметру водохранилища, эхолотные промеры водохранилища с катера, 30 мая – 7 июня 2009 г.
5. Точечные GPS промеры триангуляционных пунктов геодезической сети ГУГК, 5-9 октября 2009 г.

Полевые исследования были проведены совместно сотрудниками второго отдела ЦАИИЗ (Шабунин А., Детушев А., Дудашвили А., Азисов Э.), сотрудниками ИВПиГЭ НАН КР (Самсонова А., Жакеев Б., Шило В.), участниками проекта КР1430 (Токарев И., Шабунин Г.) и сотрудниками Каскада Токтогульских ГЭС (Нурманбетов М., Эргешов Б.). Автор выражает глубокую благодарность всем участникам полевых исследований, а также другим лицам, оказавшим помощь при выполнении данной работы.

На рис. 1 показана осушенная часть Токтогульского водохранилища. Схема расположения пунктов измерений 2008-2009 гг. представлена на рис. 2.

Методология.

Оценка содержания и распределения наносов в акватории водохранилища проводилась по следующей методике.

За «нулевой» рельеф (без заиления) был принят рельеф Токтогульского бассейна до заполнения водохранилища. Для этого были взяты топографические карты 1960 г. масштаба 1:25 000. Они были отсканированы и привязаны в равноугольной проекции Гаусса-Крюгера (СК-42, 13 зона). Эта проекция является основной для топографических карт Кыргызстана и все дальнейшие расчеты по картам производились в ней [2].

Для оценки изменения рельефа дна водохранилища (объемов и распределения наносов), были построены батиметрическая карта на момент заполнения водохранилища на основе топографических карт издания 60-х годов 20 столетия и батиметрическая карта на 2009 г. по данным экспедиционных работ проекта. Величина заиления водохранилища за время его эксплуатации выводится из разности этих двух карт.

Обработка данных.

Обработка и визуализация данных в настоящей работе проводилась с помощью следующего программного обеспечения: Topcon Linc версии 6.11.01, MapInfo Professional версии 7.8, Vertical Mapper версии 1.51, Photomod Geocalculator версии 4.3.598, Global Mapper версии 8.02, Microsoft Visual FoxPro версии 7.0, Surfer версии 8.00.

В первую очередь, по картам топографической съемки 60-х годов была построена цифровая карта рельефа местности с горизонталями от 730 до 910 м (рис. 3).

В результате полевых исследований были получены 4 вида данных: точечные GPS измерения, проведенные при помощи Topcon GB-1000 на осушенной части водохранилища, прибрежные замеры глубин выборочных участков полученные с помощью эхолота Humminbird PiranhaMAX 240, профили на осушенной территории с помощью геодезического прибора Leica, и продолжение этих профилей на акватории водохранилища, полученные с использованием системы эхолокации дна водоемов Ceeducer.



Рис. 1. Осушенная часть Токтогульского водохранилища (17.05.2008 г.)

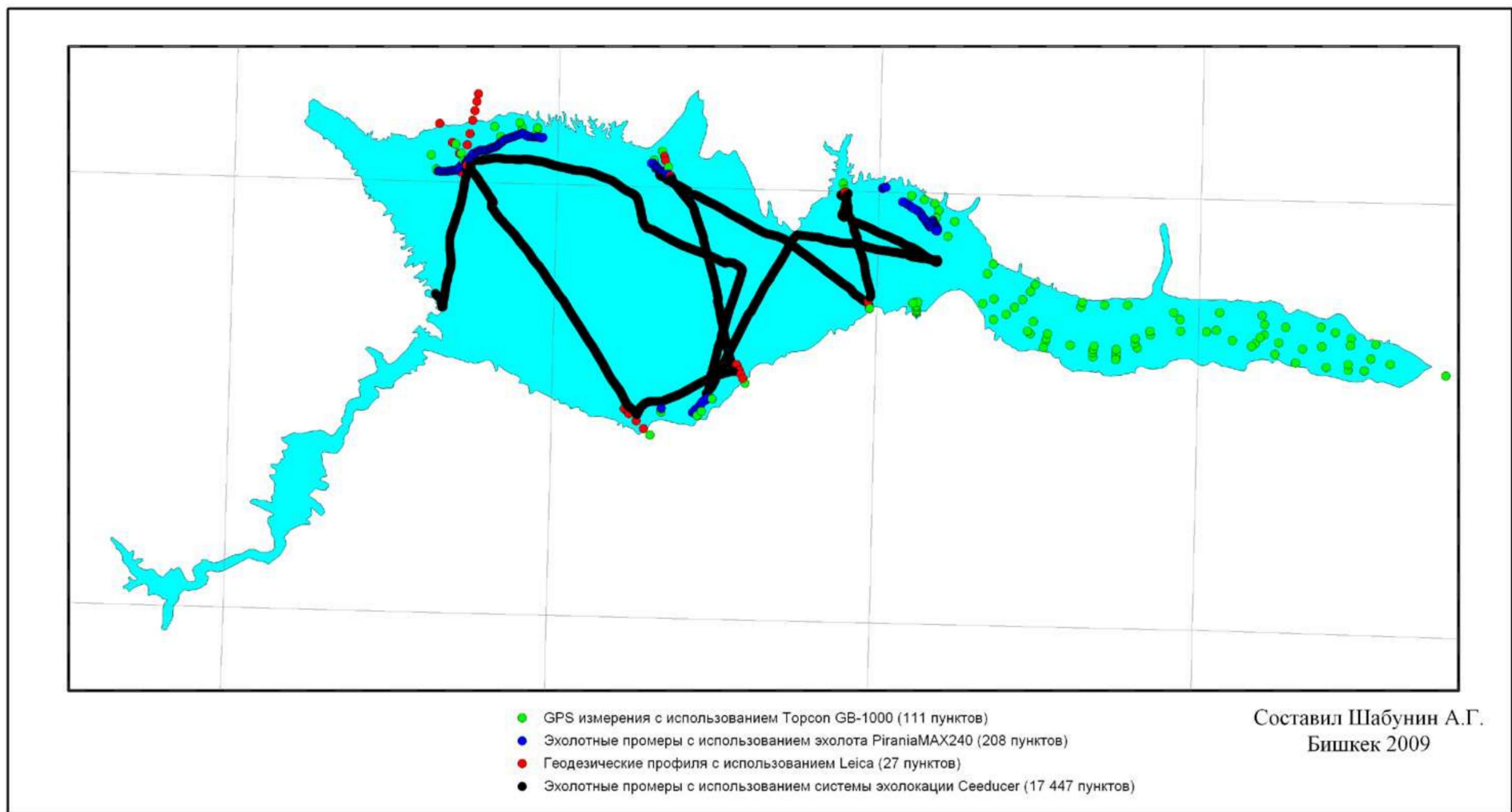


Рис. 2. Схема расположения пунктов измерений 2008-2009 гг.

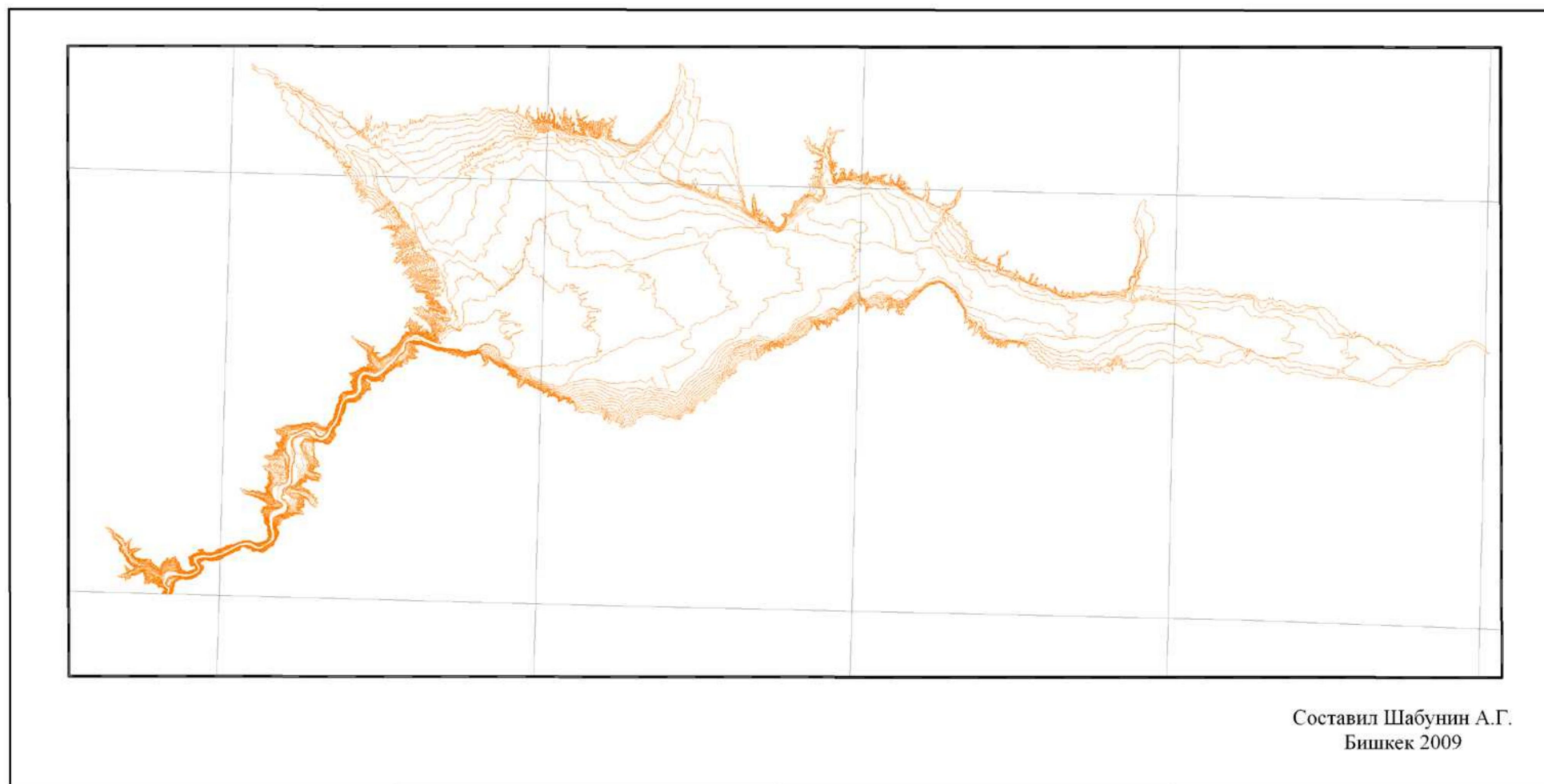


Рис. 3. Цифровая карта Токтогульского водохранилища по материалам топографической съемки 60-х годов
(изолинии проведены через 10 м)

Для каждого вида данных была проведена индивидуальная обработка:

1. GPS измерения потребовали наименьшей обработки, так как прибор дает абсолютные значения координат и высоты местности в системе WGS-84.
2. Для определения абсолютных высот местности в пунктах измерения прибрежных глубин с помощью эхолота, на каждом участке на урез воды устанавливался Торсон GB-1000, и далее полученная глубина вычиталась из абсолютного значения уреза воды.
3. Для определения абсолютных высот местности пунктов, полученных путем профилирования при помощи Leica начальная и конечная точки профиля снимались с помощью Торсон, а координаты и высоты промежуточных пунктов рассчитывались по относительным изменениям расстояний и превышений.
4. Абсолютные значения высот местности для пунктов измерений полученных с помощью системы эхолокации рассчитывались по схеме аналогичной используемой для пересчета глубин полученных с помощью эхолота. Различие заключалось в том, что абсолютные значения высоты уреза воды определялись с помощью Торсон в конечном и начальном пунктах профиля. А так как за время прохождения профиля уровень немного изменялся, то значения для каждого пункта рассчитывались в зависимости от удаления этого пункта от начального и конечного пункта профиля.

Таким образом, были получены абсолютные значения высот местности для каждого пункта наблюдения. Так как координаты и абсолютные высоты всех пунктов были получены непосредственно или с помощью GPS Торсон, их значения соответствуют системе координат WGS-84. При этом, топографические карты съемки 60-х годов были сделаны в системе координат СК-42 и Балтийской системе высот. Поэтому координаты всех пунктов при проведении полевых работ, были пересчитаны в этих системах. Пересчет был произведен при помощи Географического Калькулятора Photomod, версии 4.3.598.

На основе полученной цифровой карты рельефа по материалам топографической съемки 60-х годов и данных полученных во время полевых исследований, была построена новая цифровая карта рельефа местности (рис. 4) и проведено сравнение изменения ландшафтов, которое дало наглядное представление о распределении наносов по акватории водохранилища (рис. 5).

Далее, по полученным цифровым картам были рассчитаны объемы воды Токтогульского водохранилища, при этом объем наиболее глубокого, или первого от дна, слоя вычисляется по формуле усеченного параболоида [3]:

$$\delta W_{0-1} = 2/3 \omega_1 \Delta Z_{0-1},$$

а всех других – по формуле усеченной пирамиды:

$$\delta W_{1-2} = (\omega_1 + \omega_2)/2 \Delta Z_{1-2}; \delta W_{2-3} = (\omega_2 + \omega_3)/2 \Delta Z_{2-3}; \text{ и т.д.}$$

где δW_{0-1} – объем воды наиболее глубокого, нижнего слоя;

δW_{x-y} – объем воды слоя между изолиниями x и y ;

ω_x – площадь ограниченная изолинией x ;

ΔZ_{x-y} – разность высот между слоями y и x .

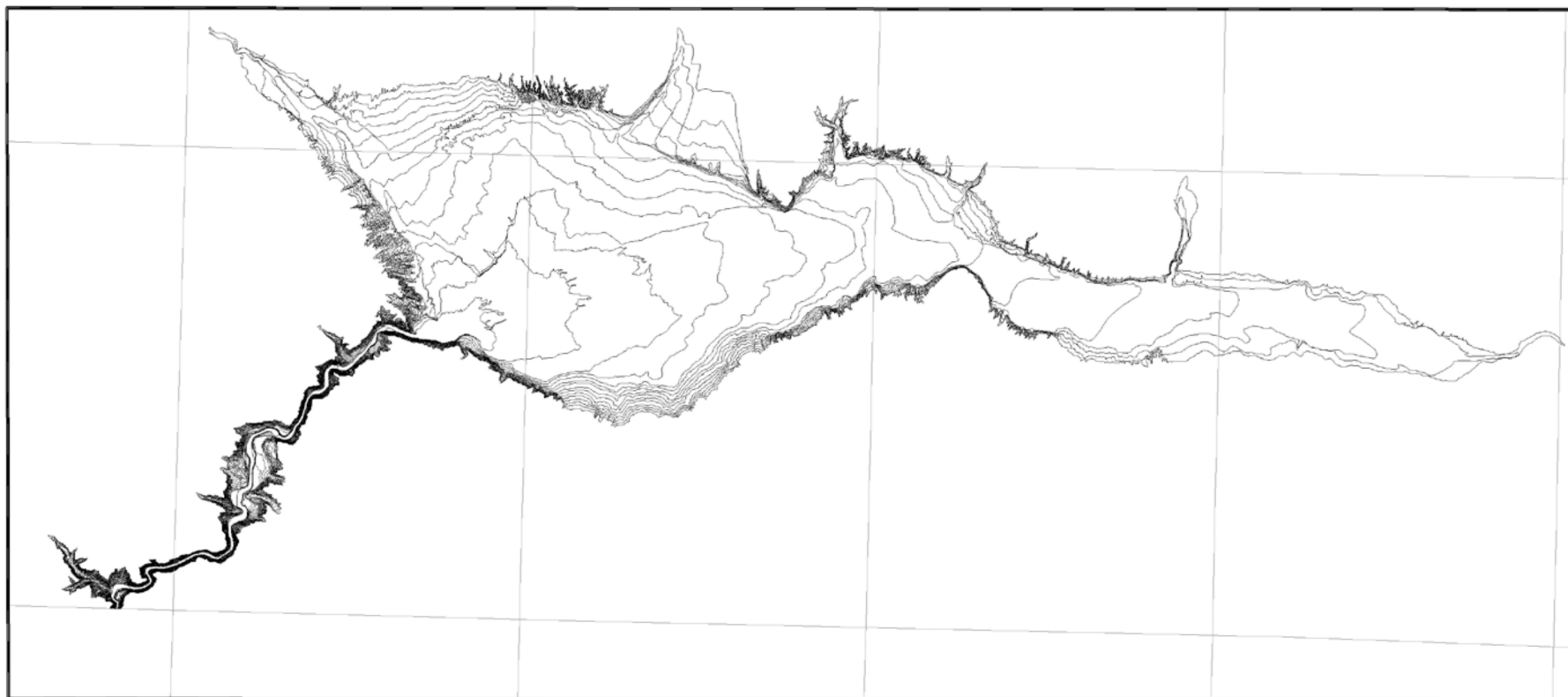
Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Распределение наносов по акватории водохранилища можно проследить при совмещении слоев рельефа местности на 3-D модели (рис. 6).

Для проверки полученных результатов была проведена теоретическая оценка накопившегося седиментационного материала в чаше водохранилища.

Годовой объем наносов W_n , может быть определен по формуле [4]:

$$W_n = 31536R/\beta$$



Составил Шабунин А.Г.
Бишкек 2009

Рис. 4. Цифровая карта Токтогульского водохранилища по материалам топографической съемки 60-х годов
и данным полевых исследований 2008-2009 годов
(изолинии проведены через 10 м)

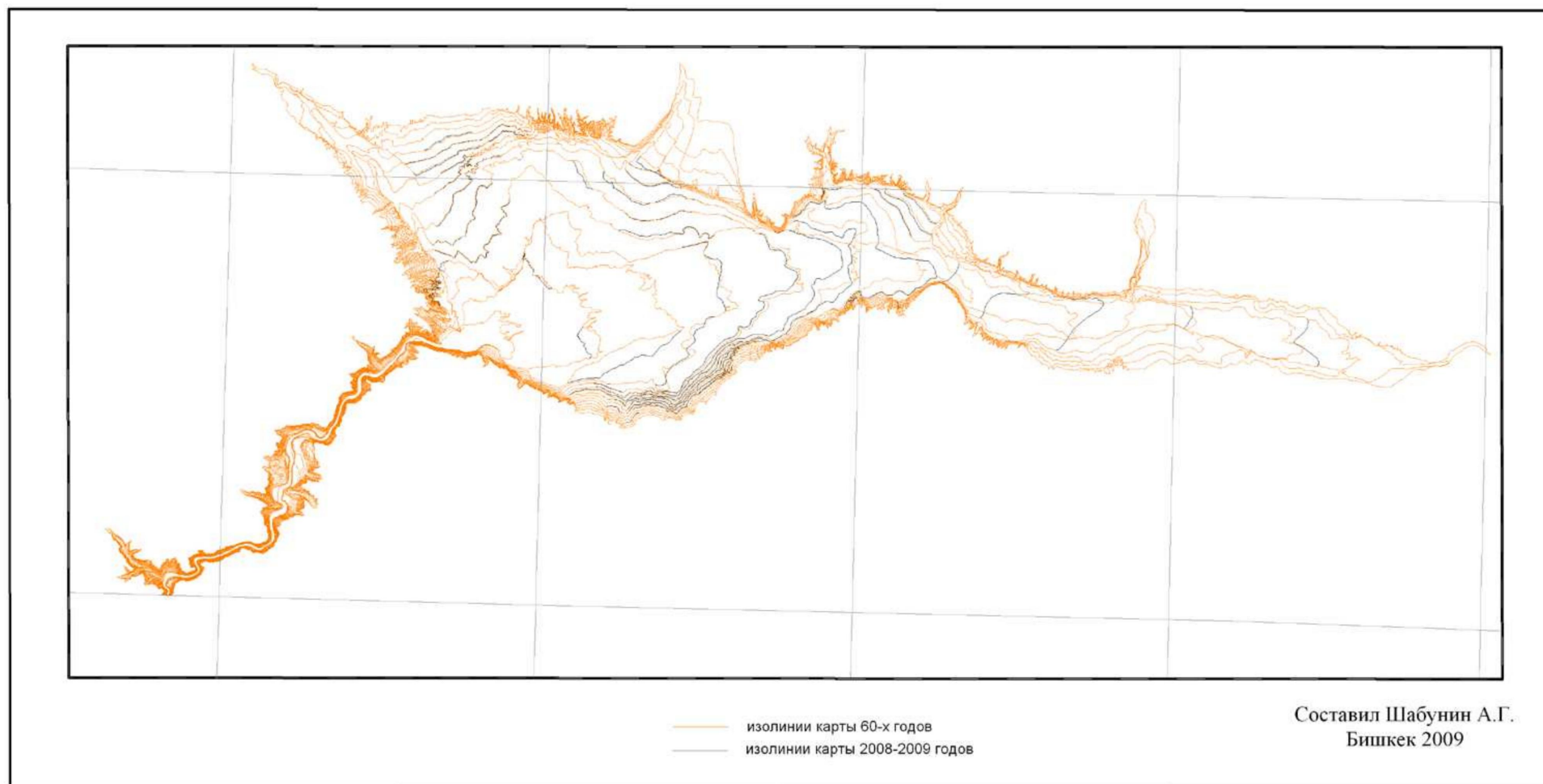


Рис. 5. Сравнение цифровых карт рельефа 60-х годов и 2008-2009 гг.
(изолинии проведены через 10 м)

Табл. 1. Сравнительный анализ площадей и объемов Токтогульского водохранилища по слоям в 60-е годы и в 2008-2009 гг.

слой (м)	средняя площадь (м ²) 1960 г.	средняя площадь (м ²) 2009 г.	разница площадей (м ²) 1960-2009 гг.	слой (м)	мощность слоя (м)	объем (м ³) 1960 г.	объем (м ³) 2009 г.	разница объемов (м ³) 1960-2009 гг.
910	319 483 730,2	319 483 730,2	0					
900	297 366 407,3	297 366 407,3	0	910-900	10	3 084 250 687,5	3 084 250 687,5	0
890	273 177 058,5	270 177 058,5	3 000 000,0	900-890	10	2 852 717 329,0	2 837 717 329,0	-15 000 000
880	250 496 398,0	243 896 398,0	6 600 000,0	890-880	10	2 618 367 282,5	2 570 367 282,5	-48 000 000
870	229 500 000,0	222 000 000,0	7 500 000,0	880-870	10	2 399 981 990,0	2 329 481 990,0	-70 500 000
860	212 791 389,6	201 291 389,6	11 500 000,0	870-860	10	2 211 456 948,0	2 116 456 948,0	-95 000 000
850	193 998 091,0	186 898 091,0	7 100 000,0	860-850	10	2 033 947 403,0	1 940 947 403,0	-93 000 000
840	174 900 000,0	170 200 000,0	4 700 000,0	850-840	10	1 844 490 455,0	1 785 490 455,0	-59 000 000
830	154 600 000,0	146 500 000,0	8 100 000,0	840-830	10	1 647 500 000,0	1 583 500 000,0	-64 000 000
820	132 100 000,0	128 200 000,0	3 900 000,0	830-820	10	1 433 500 000,0	1 373 500 000,0	-60 000 000
810	101 799 451,0	100 699 451,0	1 100 000,0	820-810	10	1 169 497 255,0	1 144 497 255,0	-25 000 000
800	67 634 649,4	67 541 700,4	92 949,0	810-800	10	847 170 502,0	841 205 757,0	-5 964 745
790	43 560 000,0	46 460 000,0	-2 900 000,0	800-790	10	555 973 247,0	570 008 502,0	14 035 255
780	23 800 000,0	22 900 000,0	900 000,0	790-780	10	336 800 000,0	346 800 000,0	10 000 000
770	7 435 902,0	7 435 902,0	0	780-770	10	156 179 510,0	151 679 510,0	-4 500 000
760	3 006 000,0	3 006 000,0	0	770-760	10	52 209 510,0	52 209 510,0	0
750	1 972 000,0	1 972 000,0	0	760-750	10	24 890 000,0	24 890 000,0	0
740	701 100,0	701 100,0	0	750-740	10	13 365 500,0	13 365 500,0	0
730	203 900,0	203 900,0	0	740-730	10	4 525 000,0	4 525 000,0	0
690				730-690	40	1 812 444,4	1 812 444,4	0
				910-690	220	23 288 635 063,4	22 772 705 573,4	-515 929 490,0
				900-690	210	20 204 384 375,9	19 688 454 885,9	-515 929 490,0
				910-840	70	17 045 212 095,0	16 664 712 095,0	-380 500 000,0
				840-690	150	6 243 422 968,0	6 107 993 478,0	-135 429 490,0

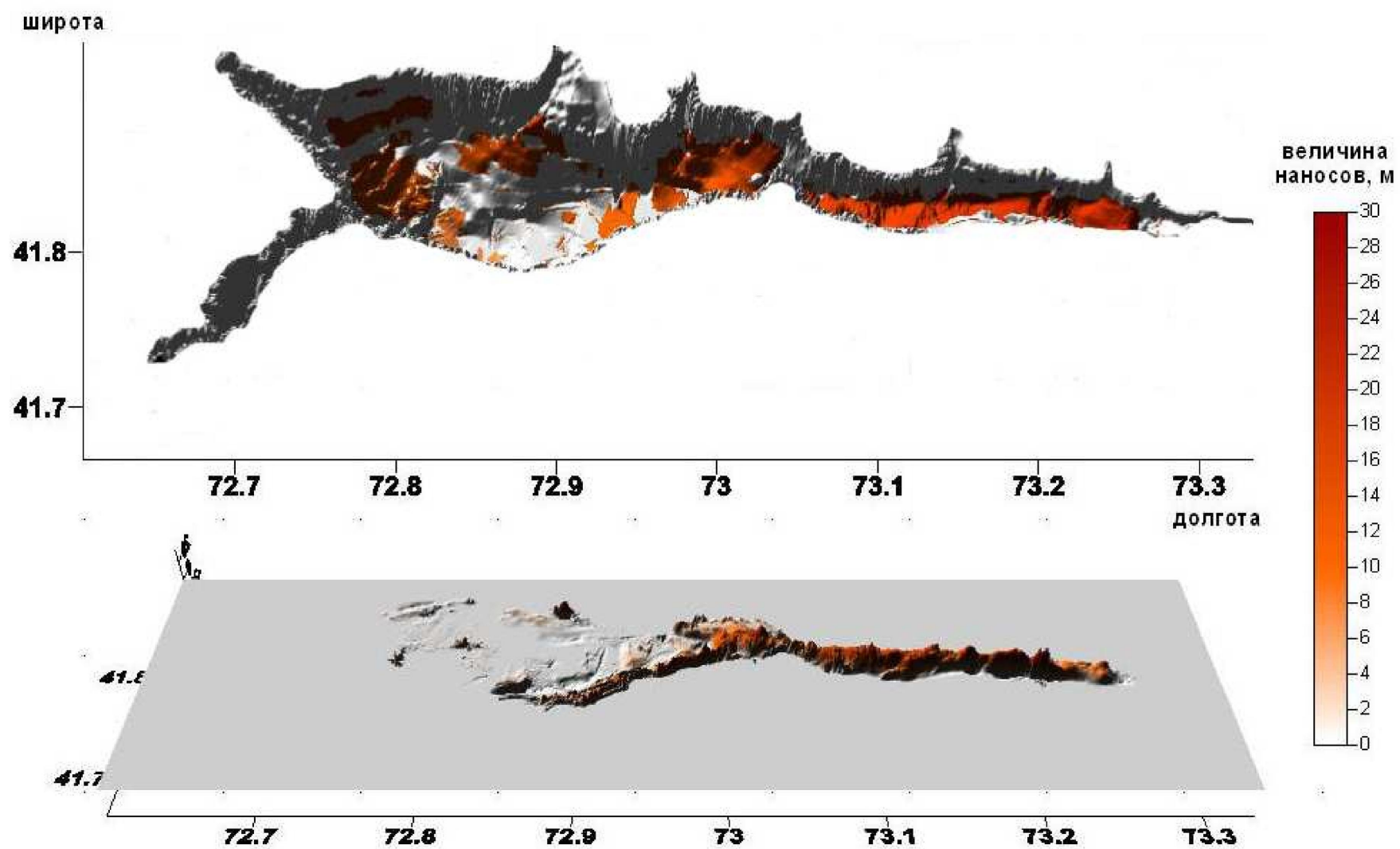


Рис. 6. Распределение наносов по акватории водохранилища

где R – годовой расход наносов в кг/сек; β – объемный вес наносов в т/м³ (в работе [4] этот коэффициент для взвешенных наносов реки Нарын принят равным 1,0 т/м³, а в [5] он принят равным 1,2 т/м³ для взвешенных наносов и 2 т/м³ для влекомых).

Среднегодовой расход взвешенных наносов за период 1961-2007 гг. по расчетам из [5, 6, 7, 8] составил 480,8 кг/с. Приняв объемный вес взвешенных наносов в среднем $\beta = 1,1$ т/м³, получим среднегодовой объем взвешенных наносов равным 13,78 млн. м³. Тогда, общий объем взвешенных наносов за период эксплуатации водохранилища (1974-2009 гг.) составит 482,3 млн. м³ или 0,48 млрд. м³.

Для определения объемов отложения влекомых наносов, было использовано процентное соотношение влекомых и взвешенных наносов, полученное по измерениям 1962-1966 гг. Это отношение примерно равно 7 %. Тогда, среднегодовой расход влекомых наносов за период 1961-2007 гг. равен 33,7 кг/с. Следовательно, среднегодовой объем влекомых наносов (при $\beta = 2$ т/м³) составит 0,53 млн. м³, а общий объем отложившихся в водохранилище, за период его эксплуатации (1974-2009 гг.), влекомых наносов реки Нарын, составит 18,6 млн. м³ или 0,02 млрд. м³.

Суммируя полученные величины взвешенных и влекомых наносов, находим, что общий объем отложившихся в водохранилище за период его эксплуатации наносов р. Нарын, составляет 500,9 млн. м³ или 0,50 млрд. м³.

Эта величина хорошо согласуется с величиной рассчитанной непосредственными измерениями (0,52 млрд. м³). Однако следует отметить, что полученное теоретическим путем значение, является лишь оценочным результатом и не имеет строгого соответствия с действительными объемами заилиenia Токтогульского водохранилища по следующим причинам:

- во-первых, измерения твердых наносов, применяемыми для этих целей приборами, выполняются с существенной погрешностью, а доля влекомых наносов ориентировочно оценивается в 7 % от измеренных взвешенных;
- во-вторых, в настоящее время нет достаточно точных расчетов объемного веса (плотности отложений) наносов для Токтогульского водохранилища;
- в-третьих, теоретическая оценка проведена только для р. Нарын, и хотя основная масса седиментационного материала попадающего в водохранилище проходит по р. Нарын (более 90%), другие реки бассейна также участвуют в процессе его заилиenia.

Основные результаты.

1. Для оценки объемов заилиenia Токтогульского водохранилища в данном исследовании был выбран метод батиметрической съемки его акватории, и определения абсолютных высот местности в осушенной части. Этот метод, по сравнению с другими методами определения заилиений водохранилищ, является наиболее точным при оценке действительных объемов накопившегося твердого материала в чаше водохранилища.
2. Для проведения расчетов по данному методу, были использованы топографические карты масштаба 1: 25 000 (съемка 60-х годов, до создания водохранилища) и проведен ряд полевых исследований по определению абсолютных высот местности. По результатам данных работ были построены цифровые карты рельефа местности до создания водохранилища и на текущий момент времени.
3. Проведены расчеты заилиenia Токтогульского водохранилища за период его эксплуатации. Объем заилиenia составил 0,52 млрд. м³.
4. Расчеты заилиenia Токтогульского водохранилища за период его эксплуатации предлагаемым методом (0,52 млрд. м³) хорошо согласуются с теоретической оценкой отложений влекомых и взвешенных наносов (0,50 млрд. м³).
5. Заилиenie водохранилища происходит в интервале высот 900 – 770 метров над

уровнем моря (в Балтийской системе высот). Выше 900 метров изменения рельефа местности не наблюдается, что связано с заполнением водохранилища не выше этой отметки. Также не определено изменение рельефа ниже 770 метров, это связано с тем, что рельеф с данными высотами представлен каньоном, ведущим к плотине водохранилища, а там измерения не проводились по причине плохой видимости приборами спутников, преломлениями отражений при эхолотации и незначительной доли объема воды по сравнению с основной чашей водохранилища.

6. В интервале высот 780-800 м наблюдается отрицательный баланс осаднения ($0,24 \text{ млрд. м}^3$), что, по нашему мнению, связано с вымыванием на этих глубинах донного грунта в период заполнения водохранилища.
7. Уровень мертвого объема (УМО) Токтогульского водохранилища находится на отметке 837 м. В зоне полезного объема отложено $0,38 \text{ млрд. м}^3$ наносов (2,3 % от общей величины полезного объема), и $0,14 \text{ млрд. м}^3$ в зоне мертвого объема (2,2 %).
8. В результате расчетов по топографическим картам съемки 1960-х годов, была получена величина полного объема Токтогульского водохранилища – $20,0 \text{ млрд. м}^3$ при уровне 900 м. Однако по литературным данным эта величина составляет $19,5 \text{ млрд. м}^3$. Причина этой невязки требует специального детального изучения.

Список использованных источников

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водоохранилища Средней Азии / Под ред. А.М. Никитина. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 168 с.
2. Справочник по картографии / А.М. Берлянт, А.В. Гедымин, Ю.Г. Кельнер и др. – М.: Недра, 1988. – 428 с.
3. В.Д. Быков, А.В. Васильев. Гидрометрия. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 448 с.
4. Биленко В.А. Заиление водохранилищ на реке Нарын. / Метеорология и гидрология в Кыргызстане. Вып. 2 /Под ред. О.А. Подрезова. /Кыргызско-Российский Славянский университет. - Бишкек, 2002. - 168 с.
5. Сводная пояснительная записка «Камбаратинская ГЭС-2, На реке Нарын в Кыргызской Республике, Актуализация проекта», Москва, 2008 г. – 135 с.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.14. Вып. 1. Бассейн р.Сыр-Дарья / Под ред. И.А.Ильина. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 440 с.
7. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том XI. Киргизская ССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 452 с.
8. Чодураев Т.М. Водная денудация и ее влияние на горные геосистемы Кыргызстана (на основе анализа стока взвешенных наносов). – автореферат диссертации на соискание ученой степени д.г.н. – Бишкек, 2007. – 50 с.