



# **УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕЖИМАМИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ПРИ СМЕНЕ РАБОТЫ ГЭС**

**ПРЕЗЕНТАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ,  
ПРЕДСТАВЛЕННОЙ НА ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС СТУДЕНЧЕСКИХ  
НАУЧНЫХ РАБОТ РУСГИДРО «ЭНЕРГИЯ РАЗВИТИЯ - 2011»**

**г. Новочеркасск, 2011 год**



**РусГидро**

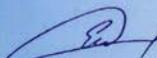
# ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

лауреат конкурса студенческих проектов  
**ЭНЕРГИЯ РАЗВИТИЯ**

аспирант Новочеркасской государственной  
мелиоративной академии

**Кувалкин**  
**Александр Алексеевич**

Председатель Жюри конкурса  
Председатель Правления ОАО «РусГидро»  Е.В. Дод

Декабрь 2011  
Москва



**Фортум**



РусГидро

**Schneider**  
Electric

## ДИПЛОМ ЛАУРЕАТА

Молодежной программы «Инвестируя в будущее» в рамках  
Десятой ежегодной выставки и конференции Russia Power 2012

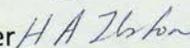
Награждается

**Кувалкин Александр Алексеевич**

за проявленную инициативу, комплексный  
творческий подход к созданию проекта и  
активное участие в развитии российской  
энергетики

Исполнительный директор МАКО 

Голышенкова  
Ольга Михайловна

Директор конференции Russia Power 

Доктор  
Хезэр Джонстон



**ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ  
И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ**



www.fat.ru  
**FUTURE  
TODAY**

**РОС  
МОЛОДЕЖЬ**

## 1. ОСНОВНЫЕ ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛИ ВЕРХНЕЙ КУБАНИ

К бассейну Верхней Кубани относится часть бассейна течения р. Кубань с ее притоками в пределах современных границ Карачаево-Черкесской Республики. Водные ресурсы Верхней Кубани формируются в пространственных пределах бассейновой геосистемы ( $W_{Б.Г.}=113$  тыс. км<sup>3</sup>), включающие в себя приземные слои атмосферы, высотой до 10 км ( $W_{ат.}=110$  тыс. км<sup>3</sup>), гидросферу ( $F_{Б.Г.}=11$  тыс.км<sup>2</sup>) в виде гидрографической сети из более, чем 400 малых рек и водотоков и верхние слои литосферы, глубиной до 300 м, в которых формируется подземный сток.

Основными водопользователями Верхней Кубани являются Большой Ставропольский канал с водозаборным гидроузлом, расположенным на р. Кубань на 782 км от устья и Зеленчукская ГЭС деривационного типа, сброс агрегатов которой в р. Кубань осуществляется в районе аула Сары-Тюз на 797 км от устья (рис.1).

БСК осуществляет переброску части стока р. Кубань (до 180 м<sup>3</sup>/с) в долины рек Кумы, Калауса, Восточного Маныча. Имеет комплексное назначение – обеспечение орошения (200 тыс. га) и обводнения (3 млн.га) земель, водоснабжение населения, сельского хозяйства, промышленности, работу каскада Кубанских ГЭС (общей мощностью 270 тыс. кВт.). Работа канала обеспечивается с помощью образованного головным водозаборным сооружением Усть-Джегутинского водохранилища, сданного в эксплуатацию в 1962 г. Его назначение - обеспечение самотечного забора воды из р. Кубань и ее подача в БСК, санитарный попуск в р. Кубань (не менее 5 м<sup>3</sup>/с), сброс излишков вод, шуги и донных наносов.

Зеленчукская ГЭС введена в действие в 1999 и 2006 гг. Комплекс гидротехнических сооружений Зеленчукской ГЭС включает в себя деривационный канал длиной 33 км от створа водозаборного гидроузла на р. Б. Зеленчук до створа расположения Зеленчукской ГЭС на левом берегу р. Кубань. Из рек Б. Зеленчук, Маруха и Аксаут производится отбор воды (до 50% в половодно-паводковый период) для выработки электроэнергии. По деривационным сооружениям вода с расчетными расходам до  $76 \text{ м}^3/\text{с}$  от водозаборных гидроузлов поступает на гидроагрегаты Зеленчукской ГЭС, расположенные на левом берегу русла р. Кубань.

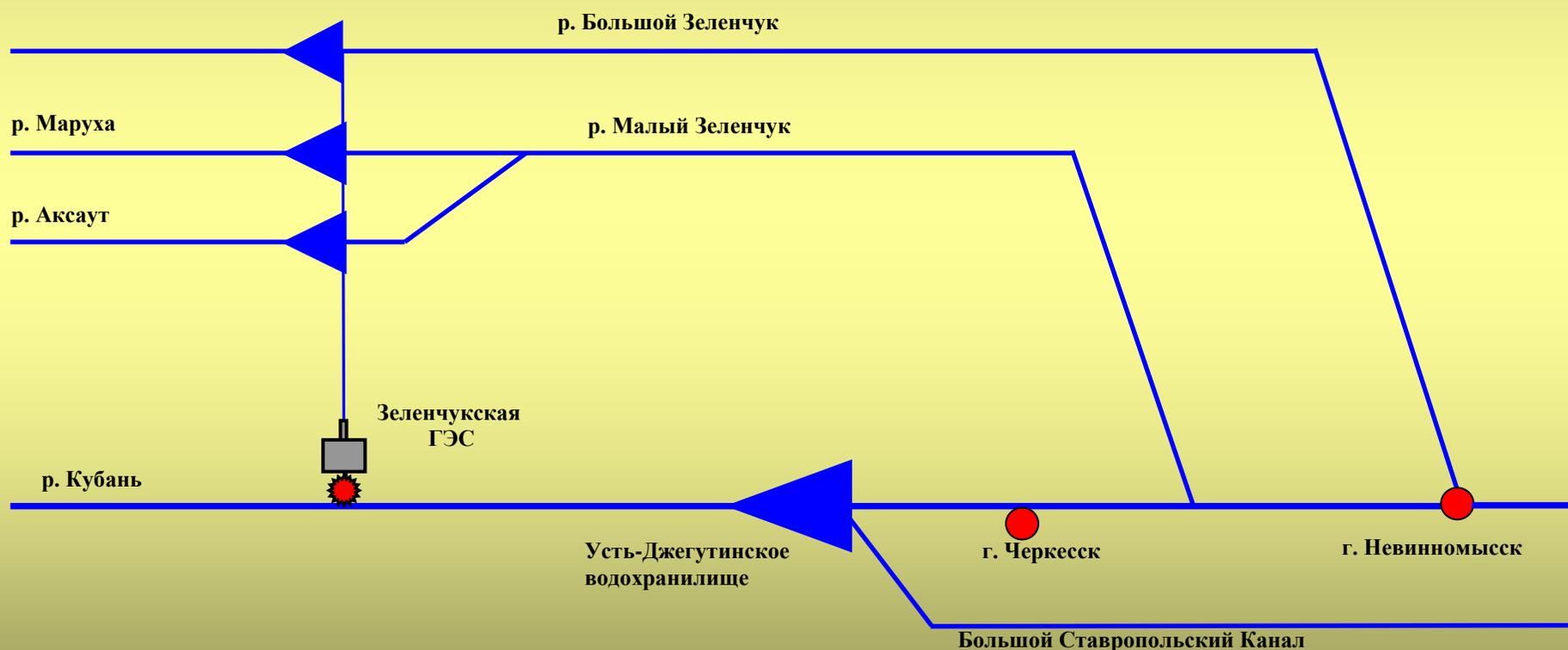


Рис.1. Схема водохозяйственной системы бассейна Верхней Кубани

Зеленчукская ГЭС работает в половодно-паводковый период (с апреля по октябрь), при этом ГЭС работает в пиковом режиме (снятие пиковых нагрузок в утренние и вечерние максимумы).

Сбросы дополнительных расходов Зеленчукской ГЭС налагаются на естественный гидрограф стока реки Кубань. Дополнительные расходы сбросов воды от гидроагрегатов Зеленчукской ГЭС колеблются в зависимости от планируемого режима в пределах от 5 до 76 м<sup>3</sup>/с.

Расчеты показали, что если на фоне сброса Зеленчукской ГЭС режим Усть-Джегутинского водохранилища остается неизменным, то через 3-3,5 часа (в зависимости от величины сбрасываемого расхода ГЭС и стока в реке) начинается постепенное повышение уровня воды у плотины, прирост максимума которого имеет место через 8 часов (если сброс Зеленчукской ГЭС продолжается 3 и более часов).

Нерегулируемые колебания уровней у плотины Усть-Джегутинского гидроузла в периоды работы гидроагрегатов Зеленчукской ГЭС не отвечают условиям безопасной эксплуатации ГТС Головного гидроузла БСК и могут создавать аварийные ситуации, поэтому необходима координация действий служб эксплуатации ГЭС и БСК в целях обеспечения безопасного транзитного пропуска расходов дополнительных расходов воды, поступающих от гидроагрегатов Зеленчукской ГЭС.

С использованием математической и физической модели выполнена оценка трансформации дополнительных расходов сбросов Зеленчукской ГЭС на нижерасположенном участке реки Кубань до створа плотины Усть-Джегутинского водохранилища. Для реализации математической модели гидравлического режима участка р. Кубань разработан специальный метод и алгоритм конечно-разностного интегрирования системы уравнений Сен-Венана. Схема моделирования участка р. Кубань в зоне влияния Зеленчукской ГЭС приведена на рис. 2.

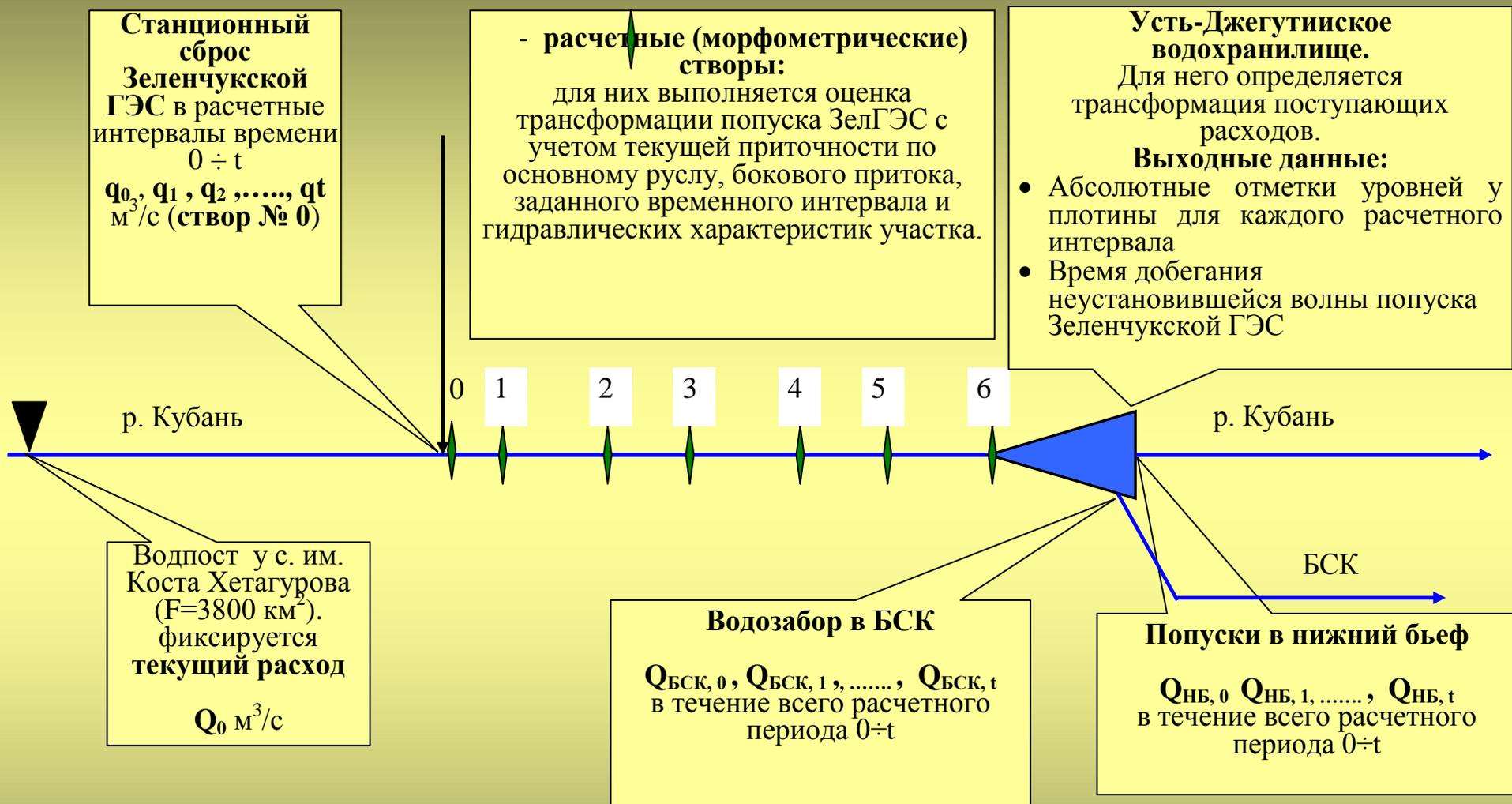


Рис. 2. Схема моделирования участка р. Кубань в зоне влияния сбросов Зеленчукской ГЭС

Разработанные правила содержат не только рекомендации в отношении действий водопользователей в определенных ситуациях водности, но также включает и технологию оперативно-диспетчерского управления транзитным пропуском дополнительных расходов сбросов воды от гидроагрегатов Зеленчукской ГЭС через Усть-Джегутинский гидроузел на основе компьютерного моделирования, а также порядок согласования совместного использования водных ресурсов Верхней Кубани БСК и Зеленчукской ГЭС, их информационного и организационно-технического взаимодействия.

Согласно имеющейся декларации по безопасности сооружений головного гидроузла БСК и правил эксплуатации, повышение уровня воды в водохранилище допускается до 20 см в сутки, но не более 1 см в час.

В соответствии с этим к приходу основной волны попуска следует заблаговременно довести суммарный расход через сооружения (сброс в р. Кубань и забор БСК) примерно равным среднему расходу притока по р.Кубань за рассматриваемый период с учетом планируемого сброса Зеленчукской ГЭС и режимов БСК с тем, чтобы прирост уровней в водохранилище не превышал допустимого максимума.

Конкретные сроки и гидрографы расходов через Усть-Джегутинский комплекс ГТС (сброс в р. Кубань и забор БСК) определяются на основе диспетчерского графика и вспомогательных к нему таблиц, определяющих характер транзитного пропуска расходов сбросов Зеленчукской ГЭС с учетом фактического попуска ГЭС (рис.3).

**Общий вид диспетчерского графика для определения дополнительного попуска в р.Кубань из Усть-Джегутинского водохранилища и/или дополнительную подачу в БСК в периоды работы Зеленчукской ГЭС, согласно ее суточному графику**

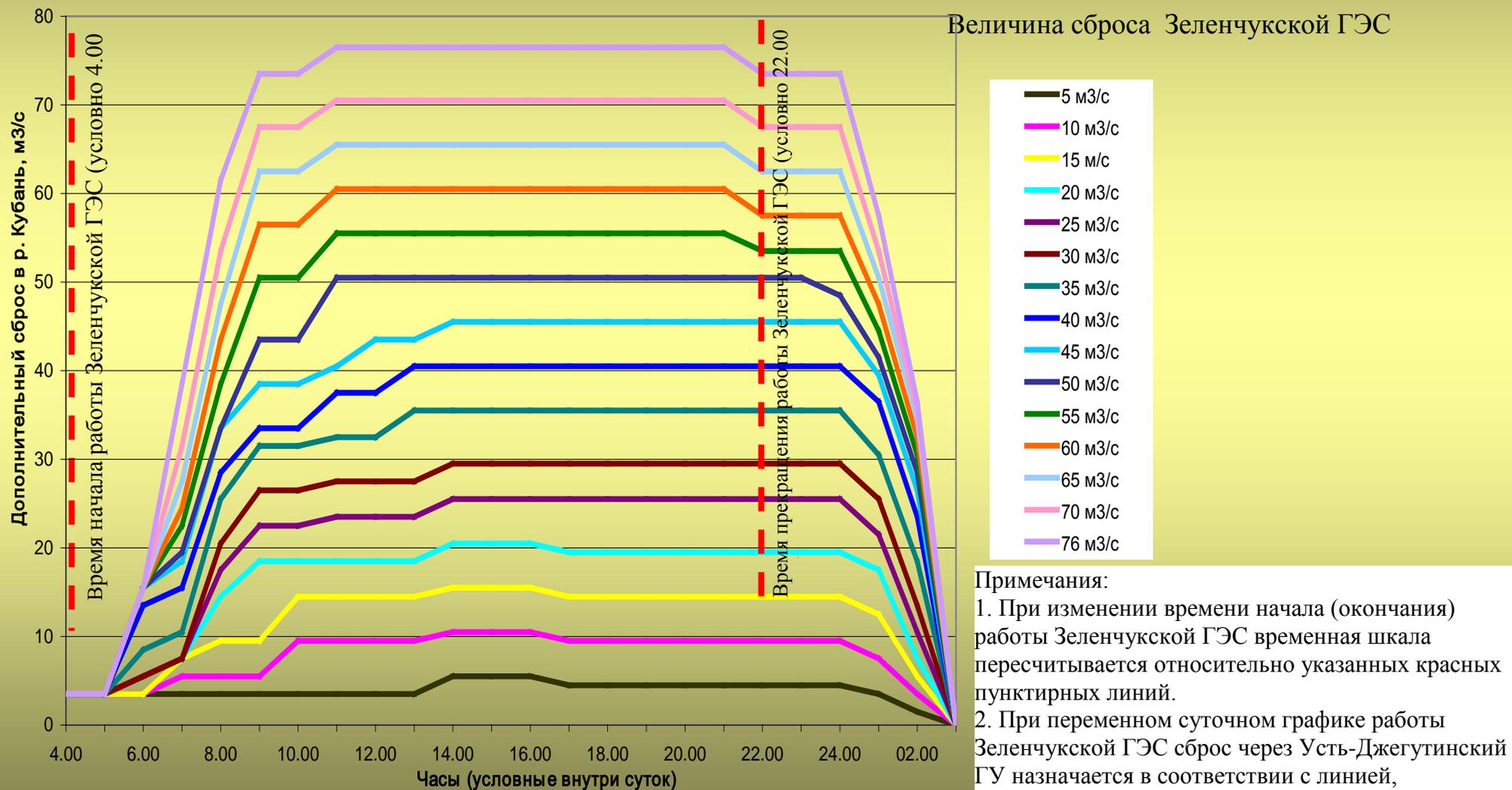


Рис.3. Диспетчерский график

## 2. ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ПРАВИЛА ПРИ УПРАВЛЕНИИ

Для подготовки оперативно-диспетчерских правил управления текущими режимами используется математическая модель и программа расчета неустановившегося потока воды на рассматриваемом участке.

Программный комплекс и математическая модель прошли опытную апробацию на основе сопоставления результатов расчетов с натурными данными и физическим моделированием. Расхождение расчетных показателей с фактическими по времени добегания расходов составляет не более 7%.

Для планирования и оперативного управления водным режимом на участке Верхней Кубани: Зеленчукская ГЭС – Головное сооружение БСК создаются автоматизированные рабочие места (АРМ). АРМ представляет собой информационно-технологический комплекс на базе персонального компьютера, предназначенный для решения задач оценки, прогнозирования, учета характеристик водного режима на участке в соответствии с текущей гидрологической обстановкой и регулированием водного стока.

Обеспечение прогнозной и текущей гидрологической информацией деятельности Зеленчукской ГЭС и ФГУ УЭ БСК осуществляется Северо-Кавказским межрегиональным территориальным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СКУГМС) на основе проводимых систематических наблюдений в бассейне Верхней Кубани. Опорным пунктом является пост наблюдений за расходами и уровнями у с. им. Коста-Хетагурова, расположенный в 17 км выше территории Зеленчукской ГЭС и 32 км выше створа плотины головного сооружения БСК.

### 3. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

3.1. Программа для персонального компьютера по расчету неустановившегося потока воды на участке р. Кубань сброс Зеленчукской ГЭС–плотина Усть-Джегутинского гидроузла, реализующая представленную математическую модель и конкретный алгоритм расчета выполнена на платформе Microsoft Excel.

Программа представляет собой шаблон MS Excel, состоящий из нескольких листов (вкладок).

3.2. Исходная информация для выполнения оперативных прогнозных расчетов вводится на листе «Исх. данные» в таблице (см. рис. 4). Для корректного отображения результата расчета необходимо заполнить все предложенные ячейки для занесения данных в соответствии с заданными единицами измерения.

3.3. Исходные данные заносятся в **серые ячейки** («рабочие ячейки»), которые не подлежат защите. В отличие от ячеек другого цвета, которые в большинстве случаев являются производными от ячеек серого цвета и содержат формулы, серые ячейки должны быть обязательно заполнены.

### 3.4. Необходимо осуществить ввод следующих данных:

- текущую дату;
- время начала попусков;
- шаг расчетного интервала (с таким шагом будет выполняться расчет и выводиться результаты). Для корректного выполнения расчетов рекомендуется устанавливать интервал не более 20 минут, т.е. 5 мин., 10 мин., 15 мин., 20 мин., или промежуточные значения,
- расход в створе водпоста у с. К.Хетагурова на текущие время и дату,
- начальный уровень в Усть-Джгутинском водохранилище,
- планируемые сбросы ЗелГЭС,
- забор в БСК и попуск в нижний бьеф водохранилища для всех интервалов расчета с установленной разбивкой. Если забор в БСК и попуск в нижний бьеф не меняются в течение всего периода, можно указать только первые значения (в программе будет учитываться, что они одинаковые во все последующие интервалы).

Microsoft Excel - Влияние ЗелГЭС - новая (19.04.07)

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка

Введите вопрос

120%

Arial Cyr 10 Ж К Ч

163 8,1

### Исходные данные для выполнения расчетов

(данные заносятся в ячейки серого цвета)

Текущая дата (полностью)	Интервал	Часы, минуты	Текущее время	Сброс ЗелГЭС	Забор БСК	Попуск в Н/Б	Интервал	Часы, минуты	Текущее время	Сброс ЗелГЭС	Забор БСК	Попуск в Н/Б
19.04.07	0	0:00	20:30	27,0	18,8	6,1	33	11:00	7:30		20	6,1
	1	0:20	20:50	27,0	18,8	6,1	34	11:20	7:50		20	6,1
<b>Время начала пусков</b>	2	0:40	21:10	27,0	20,0	6,1	35	11:40	8:10		20	6,1
<b>час:мин</b> 20:30	3	1:00	21:30	27,0	20,0	6,1	36	12:00	8:30		20	6,1
	4	1:20	21:50	27,0	20,0	6,1	37	12:20	8:50		20	6,1
<b>Интервал расчета, час:мин</b>	5	1:40	22:10	27,0	20,0	6,1	38	12:40	9:10		20	6,1
0:20	6	2:00	22:30	27,0	20,0	6,1	39	13:00	9:30		20	6,1
	7	2:20	22:50	27,0	20,0	6,1	40	13:20	9:50		20	6,1
<b>Текущий расход по в/п с. им. Коста Хетагурова, м³/с</b>	8	2:40	23:10	27,0	20,0	7,1	41	13:40	10:10		20	6,1
	9	3:00	23:30	27,0	20,0	7,1	42	14:00	10:30		20	6,1
<b>Q<sub>0</sub>=</b> 21,0	10	3:20	23:50		20,0	7,1	43	14:20	10:50		20	6,1
	11	3:40	0:10		20,0	7,1	44	14:40	11:10		20	6,1
<b>Начальный уровень в Усть-Джегутинском вдхр, м</b>	12	4:00	0:30		20,0	7,1	45	15:00	11:30		20	6,1
абс.БС	13	4:20	0:50		20,0	7,1	46	15:20	11:50		20	6,1
654,25	14	4:40	1:10		20,0	8,1	47	15:40	12:10		20	6,1
	15	5:00	1:30		20,0	8,1	48	16:00	12:30		20	6,1
	16	5:20	1:50		20,0	8,1	49	16:20	12:50		20	6,1
<b>Расходы в створах (м³/с) при неустановившемся режиме</b>	17	5:40	2:10		20,0	8,1	50	16:40	13:10		20	6,1
	18	6:00	2:30		20,0	9,1	51	17:00	13:30		20	6,1
	19	6:20	2:50		20,0	9,1	52	17:20	13:50		20	6,1
Створ 2	20	6:40	3:10		20,0	9,1	53	17:40	14:10		20	6,1
Створ 3	21	7:00	3:30		20,0	9,1	54	18:00	14:30		20	6,1
Створ 5	22	7:20	3:50		20,0	10,1	55	18:20	14:50		20	6,1
Створ 6	23	7:40	4:10		20,0	10,1	56	18:40	15:10		20	6,1
	24	8:00	4:30		20,0	10,1	57	19:00	15:30		20	6,1
	25	8:20	4:50		20,0	10,1	58	19:20	15:50		20	6,1
	26	8:40	5:10		20,0	10,1	59	19:40	16:10		20	6,1
	27	9:00	5:30		20,0	10,1	60	20:00	16:30		20	6,1
	28	9:20	5:50		20,0	10,1	61	20:20	16:50		20	6,1
	29	9:40	6:10		20,0	9,1	62	20:40	17:10		20	6,1
	30	10:00	6:30		20,0	9,1	63	21:00	17:30		20	6,1
	31	10:20	6:50		20,0	9,1	64	21:20	17:50		20	6,1
	32	10:40	7:10		20,0	9,1	65	21:40	18:10		20	6,1

Исх. данные / Таблицы / Расходы / Уровни(створ2) / Уровни(створ3) / Уровни(створ5) / Уровни(створ6) / Уровни у БСК / Фото / Служебный / Служебный2

Действия Автофиуры

Готово

Рис. 4. Вид экранного окна первого листа для ввода исходных данных

После того, как введена вся информация из списка обязательных исходных данных, автоматически выполняются все расчеты, которые можно сразу же посмотреть на других вкладках, характеризующих результаты.

**3.5. Вкладка «Таблицы».** Здесь в табличной форме представлены прогнозные расходы и уровни в основных расчетных створах: 2, 3, 5, 6 и режим уровней Усть-Джегутинского гидроузла.

На рис.5-6 представлен вид таблиц с результатами. Данные таблицы являются производными от таблиц с исходными данными и рассчитываются автоматически. Ввод данных, редактирование и форматирование этих таблиц не предусматривается (только просмотр и печать). При изменении вводимых данных на листе «Исх. данные» их содержимое изменяется.

**3.6. Вкладка «Расходы».** Данная вкладка дает графическую иллюстрацию изменения расходов в створах р. Кубань для всего расчетного периода. На данном графике легко увидеть трансформацию волны попуска и оценить время добегания отдельных ее частей до заданного створа (см. рис. 7).

**3.7 Вкладки «Уровни (створ2)», «Уровни (створ3)» и т.д.** Данные вкладки дают графическую иллюстрацию изменения уровней в соответствующих створах р. Кубань для всего расчетного периода. На данном графике легко увидеть в какое время и на сколько (в метрах) увеличивается уровень воды в створе по сравнению с первоначальным и, какие происходят колебания уровней (см. рис. 8).

**3.8. Вкладка «Уровни у БСК».** Наиболее важный лист, так как он дает картину изменения уровней воды в водохранилище, за весь период с первого момента расчета (рис.9).

Microsoft Excel - Влияние ЗелГЭС - новая (19.04.07)

Режим уровней Усть-Джегутинского водохранилища

Дата: 19.04.07		Временной период: 20:30 7:10						Дата: 19.04.07		Временной период: 7:30 18:10					
Интервал	Часы, минуты	Текущее время	Расход во входном створе водохранилища, м3/с	Забор БСК и санитарный попуск, м3/с	Глубина (уровень у плотины), м	Уровень у плотины, м абс. БС	Изменение отметки уровня, м(±)	Интервал	Часы, минуты	Текущее время	Расход во входном створе водохранилища, м3/с	Забор БСК и санитарный попуск, м3/с	Глубина (уровень у плотины), м	Уровень у плотины, м абс. БС	Изменение отметки уровня, м(±)
0	0:00	20:30	23,0	24,9	21,25	654,25	-	33	11:00	7:30	28,7	26,1	21,29	654,29	0,04
1	0:20	20:50	23,0	24,9	21,25	654,25	0,00	34	11:20	7:50	28,3	26,1	21,29	654,29	0,04
2	0:40	21:10	23,0	26,1	21,25	654,25	0,00	35	11:40	8:10	27,8	26,1	21,29	654,29	0,04
3	1:00	21:30	23,0	26,1	21,25	654,25	0,00	36	12:00	8:30	27,4	26,1	21,29	654,29	0,04
4	1:20	21:50	23,1	26,1	21,25	654,25	0,00	37	12:20	8:50	27,1	26,1	21,29	654,29	0,04
5	1:40	22:10	23,2	26,1	21,24	654,24	-0,01	38	12:40	9:10	26,7	26,1	21,29	654,29	0,04
6	2:00	22:30	23,6	26,1	21,24	654,24	-0,01	39	13:00	9:30	26,4	26,1	21,29	654,29	0,04
7	2:20	22:50	24,0	26,1	21,24	654,24	-0,01	40	13:20	9:50	26,1	26,1	21,29	654,29	0,04
8	2:40	23:10	24,5	27,1	21,24	654,24	-0,01	41	13:40	10:10	25,8	26,1	21,29	654,29	0,04
9	3:00	23:30	25,2	27,1	21,24	654,24	-0,01	42	14:00	10:30	25,5	26,1	21,29	654,29	0,04
10	3:20	23:50	25,9	27,1	21,23	654,23	-0,02	43	14:20	10:50	25,3	26,1	21,29	654,29	0,04
11	3:40	0:10	26,9	27,1	21,23	654,23	-0,02	44	14:40	11:10	25,1	26,1	21,29	654,29	0,04
12	4:00	0:30	28,1	27,1	21,23	654,23	-0,02	45	15:00	11:30	24,9	26,1	21,29	654,29	0,04
13	4:20	0:50	29,4	27,1	21,23	654,23	-0,02	46	15:20	11:50	24,7	26,1	21,29	654,29	0,04
14	4:40	1:10	30,6	28,1	21,24	654,24	-0,01	47	15:40	12:10	24,5	26,1	21,29	654,29	0,04
15	5:00	1:30	31,8	28,1	21,24	654,24	-0,01	48	16:00	12:30	24,4	26,1	21,29	654,29	0,04
16	5:20	1:50	33,2	28,1	21,24	654,24	-0,01	49	16:20	12:50	24,2	26,1	21,28	654,28	0,03
17	5:40	2:10	34,3	28,1	21,24	654,24	-0,01	50	16:40	13:10	24,1	26,1	21,28	654,28	0,03
18	6:00	2:30	35,1	29,1	21,25	654,25	0,00	51	17:00	13:30	24,0	26,1	21,28	654,28	0,03
19	6:20	2:50	35,4	29,1	21,25	654,25	0,00	52	17:20	13:50	23,9	26,1	21,28	654,28	0,03
20	6:40	3:10	35,4	29,1	21,26	654,26	0,01	53	17:40	14:10	23,8	26,1	21,28	654,28	0,03
21	7:00	3:30	35,2	29,1	21,26	654,26	0,01	54	18:00	14:30	23,7	26,1	21,28	654,28	0,03
22	7:20	3:50	34,7	30,1	21,27	654,27	0,02	55	18:20	14:50	23,7	26,1	21,27	654,27	0,02
23	7:40	4:10	34,1	30,1	21,27	654,27	0,02	56	18:40	15:10	23,6	26,1	21,27	654,27	0,02
24	8:00	4:30	33,4	30,1	21,27	654,27	0,02	57	19:00	15:30	23,5	26,1	21,27	654,27	0,02
25	8:20	4:50	32,7	30,1	21,28	654,28	0,03	58	19:20	15:50	23,5	26,1	21,27	654,27	0,02
26	8:40	5:10	32,1	30,1	21,28	654,28	0,03	59	19:40	16:10	23,4	26,1	21,27	654,27	0,02
27	9:00	5:30	31,6	30,1	21,28	654,28	0,03	60	20:00	16:30	23,4	26,1	21,26	654,26	0,01
28	9:20	5:50	31,1	30,1	21,28	654,28	0,03	61	20:20	16:50	23,3	26,1	21,26	654,26	0,01
29	9:40	6:10	30,6	29,1	21,28	654,28	0,03	62	20:40	17:10	23,3	26,1	21,26	654,26	0,01
30	10:00	6:30	30,1	29,1	21,28	654,28	0,03	63	21:00	17:30	23,3	26,1	21,26	654,26	0,01
31	10:20	6:50	29,6	29,1	21,28	654,28	0,03	64	21:20	17:50	23,2	26,1	21,26	654,26	0,01
32	10:40	7:10	29,2	29,1	21,28	654,28	0,03	65	21:40	18:10	23,2	26,1	21,25	654,25	0,00

Готово

Рис. 5. Вкладка «Таблицы» - Режим уровней Усть-Джегутинского водохранилища

Microsoft Excel - Влияние ЗелГЭС - новая (19.04.07)

Расходы и уровни в расчетных створах

Р. Кубань створ №6, в 24 м выше вантового перехода газопровода, в 1 км южнее х. Важный

Дата:	19.04.07							Дата:	19.04.07						
Интервал	Часы, минуты	Текущее время	Расход в створе, м3/с	Изменение расхода, м3/с(±)	Средняя глубина, м	Уровень относительно отметки дна, м	Изменение отметки уровня, м(±)	Интервал	Часы, минуты	Текущее время	Расход в створе, м3/с	Изменение расхода, м3/с(±)	Средняя глубина, м	Уровень относительно отметки дна, м	Изменение отметки уровня, м(±)
0	0:00	20:30	23,0	-	0,52	0,80	-	33	11:00	7:30	28,7	5,7	0,64	0,99	0,20
1	0:20	20:50	23,0	0,0	0,52	0,80	0,00	34	11:20	7:50	28,3	5,3	0,63	0,98	0,18
2	0:40	21:10	23,0	0,0	0,52	0,80	0,00	35	11:40	8:10	27,8	4,8	0,62	0,96	0,17
3	1:00	21:30	23,0	0,0	0,52	0,80	0,00	36	12:00	8:30	27,4	4,4	0,61	0,95	0,15
4	1:20	21:50	23,1	0,1	0,52	0,80	0,00	37	12:20	8:50	27,1	4,1	0,61	0,94	0,14
5	1:40	22:10	23,2	0,3	0,52	0,80	0,01	38	12:40	9:10	26,7	3,7	0,60	0,92	0,13
6	2:00	22:30	23,6	0,6	0,53	0,81	0,02	39	13:00	9:30	26,4	3,4	0,59	0,91	0,12
7	2:20	22:50	24,0	1,0	0,54	0,83	0,03	40	13:20	9:50	26,1	3,1	0,58	0,90	0,11
8	2:40	23:10	24,5	1,5	0,55	0,85	0,05	41	13:40	10:10	25,8	2,8	0,58	0,89	0,10
9	3:00	23:30	25,2	2,2	0,56	0,87	0,07	42	14:00	10:30	25,5	2,5	0,57	0,88	0,09
10	3:20	23:50	25,9	2,9	0,58	0,90	0,10	43	14:20	10:50	25,3	2,3	0,57	0,88	0,08
11	3:40	0:10	26,9	3,9	0,60	0,93	0,14	44	14:40	11:10	25,1	2,1	0,56	0,87	0,07
12	4:00	0:30	28,1	5,1	0,63	0,97	0,18	45	15:00	11:30	24,9	1,9	0,56	0,86	0,07
13	4:20	0:50	29,4	6,4	0,66	1,02	0,22	46	15:20	11:50	24,7	1,7	0,55	0,85	0,06
14	4:40	1:10	30,6	7,6	0,69	1,06	0,26	47	15:40	12:10	24,5	1,5	0,55	0,85	0,05
15	5:00	1:30	31,8	8,8	0,71	1,10	0,30	48	16:00	12:30	24,4	1,4	0,55	0,84	0,05
16	5:20	1:50	33,2	10,2	0,73	1,13	0,33	49	16:20	12:50	24,2	1,2	0,54	0,84	0,04
17	5:40	2:10	34,3	11,3	0,73	1,15	0,35	50	16:40	13:10	24,1	1,1	0,54	0,83	0,04
18	6:00	2:30	35,1	12,1	0,73	1,16	0,37	51	17:00	13:30	24,0	1,0	0,54	0,83	0,03
19	6:20	2:50	35,4	12,4	0,74	1,17	0,37	52	17:20	13:50	23,9	0,9	0,54	0,83	0,03
20	6:40	3:10	35,4	12,4	0,74	1,17	0,37	53	17:40	14:10	23,8	0,8	0,53	0,82	0,03
21	7:00	3:30	35,2	12,2	0,73	1,17	0,37	54	18:00	14:30	23,7	0,7	0,53	0,82	0,03
22	7:20	3:50	34,7	11,7	0,73	1,16	0,36	55	18:20	14:50	23,7	0,7	0,53	0,82	0,02
23	7:40	4:10	34,1	11,1	0,73	1,14	0,35	56	18:40	15:10	23,6	0,6	0,53	0,82	0,02
24	8:00	4:30	33,4	10,4	0,73	1,13	0,34	57	19:00	15:30	23,5	0,5	0,53	0,81	0,02
25	8:20	4:50	32,7	9,8	0,72	1,12	0,32	58	19:20	15:50	23,5	0,5	0,53	0,81	0,02
26	8:40	5:10	32,1	9,1	0,72	1,11	0,31	59	19:40	16:10	23,4	0,4	0,52	0,81	0,01
27	9:00	5:30	31,6	8,6	0,71	1,09	0,30	60	20:00	16:30	23,4	0,4	0,52	0,81	0,01
28	9:20	5:50	31,1	8,1	0,70	1,08	0,28	61	20:20	16:50	23,3	0,3	0,52	0,81	0,01
29	9:40	6:10	30,6	7,6	0,69	1,06	0,26	62	20:40	17:10	23,3	0,3	0,52	0,81	0,01
30	10:00	6:30	30,1	7,1	0,68	1,04	0,25	63	21:00	17:30	23,3	0,3	0,52	0,81	0,01
31	10:20	6:50	29,6	6,7	0,66	1,03	0,23	64	21:20	17:50	23,2	0,2	0,52	0,80	0,01
32	10:40	7:10	29,2	6,2	0,65	1,01	0,21	65	21:40	18:10	23,2	0,2	0,52	0,80	0,01

Рис. 6. Вкладка «Таблицы» - расходы и уровни в расчетных створах

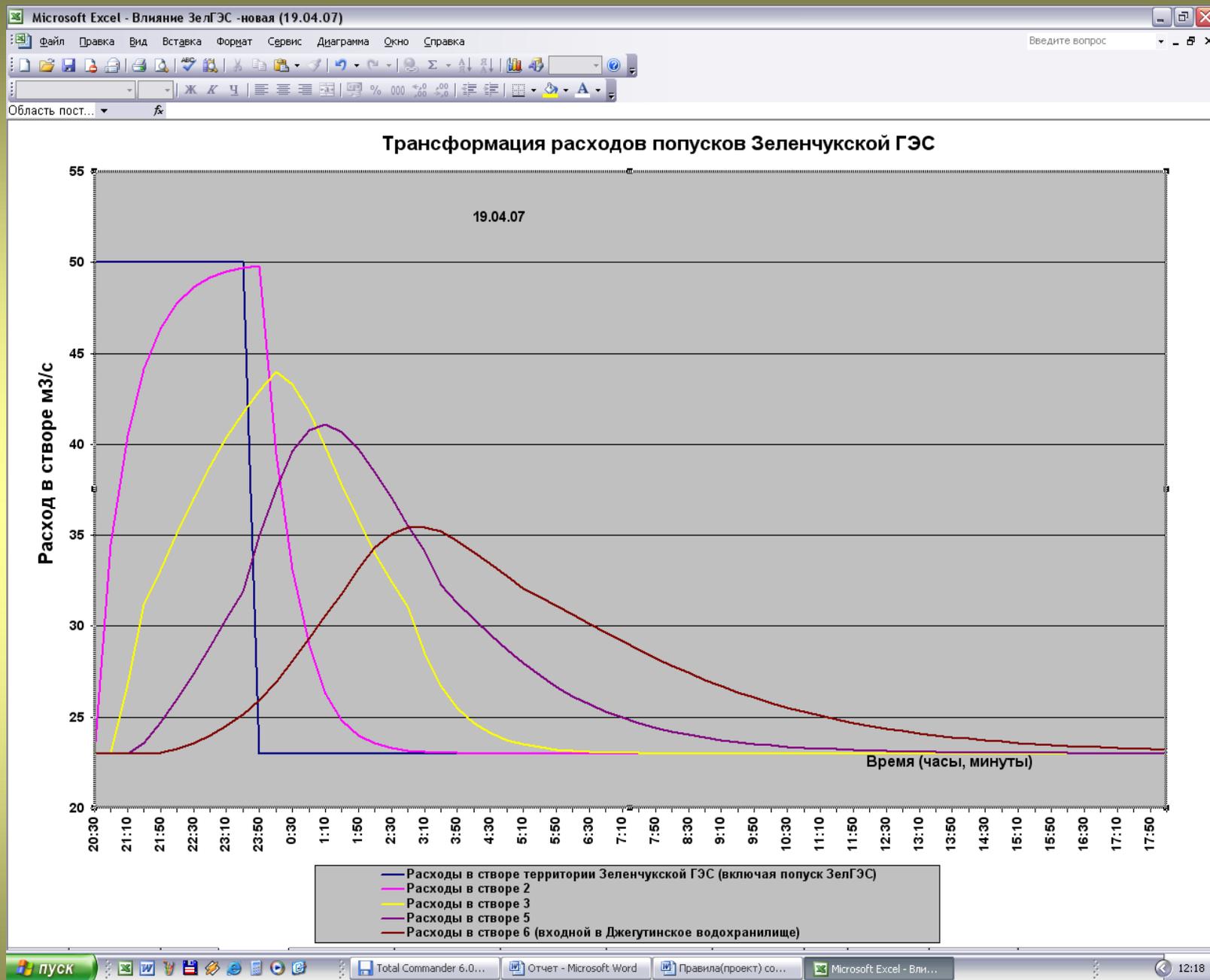


Рис. 7. Вкладка «Расходы». Иллюстрация трансформации расходов попусков ГЭС.

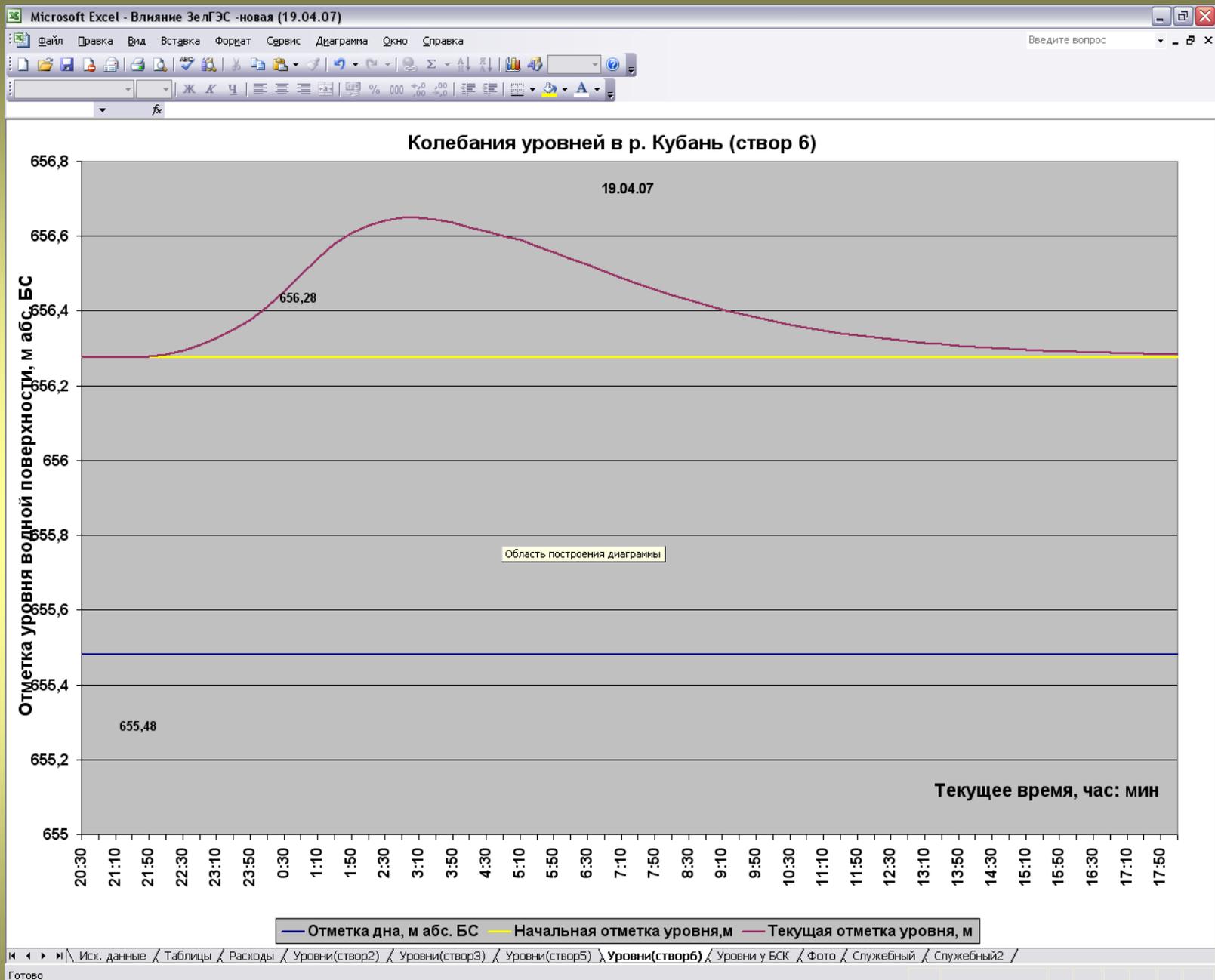


Рис. 8 Вкладка «Уровни (створ6)». Графическая иллюстрация колебания уровней в створе.

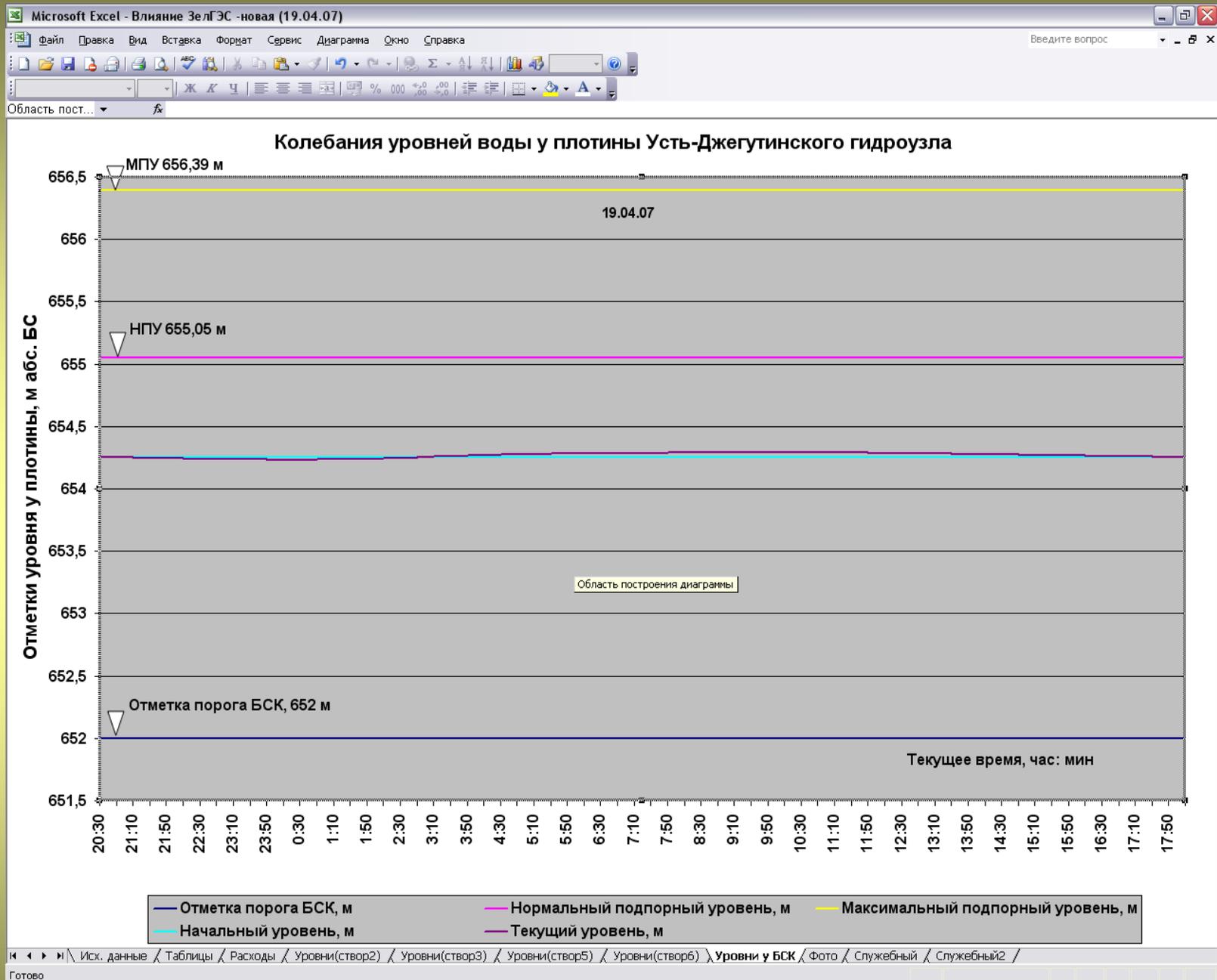


Рис. 9. Вкладка «Уровни у БСК».

3.9. Другие вкладки являются служебными, обеспечивающими реализацию алгоритма решение данной задачи. Поэтому они защищены от редактирования и внесения изменений в целях безопасности от повреждения программы расчетов.

3.10. Все таблицы и графики отформатированы для печати и полученные результаты в виде графических и табличных приложений могут быть отправлены на печать стандартным способом, как предусмотрено в приложениях MS Office.

3.11. Каждый законченный расчет, проводимый с программой, в окончательном виде, целесообразно сохранять в виде отдельного файла (проекта) на определенную дату и вариант расчета и вести архив расчетных вариантов. Это позволяет с одной стороны восстановить при необходимости картину, имевшую место на определенную дату, а с другой использовать прежние варианты в качестве шаблонов для последующих расчетов.

В процессе расчета можно варьировать всеми предложенными параметрами, представленными на вкладке (листе) «Исх. данные».

## 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА УЧАСТКЕ

*Математическая постановка задачи и модель расчета неустановившегося потока воды на рассматриваемом участке.*

Расчет движения воды в русле описывается с помощью дифференциальных уравнений неустановившегося потока водных масс, хорошо разработанных и изученных в гидродинамике. Модель медленно изменяющегося неустановившегося неравномерного движения водных масс включает уравнения неразрывности и количества движения. Консервативная форма одномерного уравнения неразрывности для речных русел, имеющих боковые притоки, имеет вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q, \quad (1)$$

а в развернутой форме:

$$\omega \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q \quad (2)$$

где:  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;

$\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;

$V$  – средняя скорость течения, м/с;

$q$  – боковой приток на единицу длины, м<sup>2</sup>/с;

$x$  и  $t$  – соответственно пространственная и временная координаты, м и сек.

Развернутая форма одномерного уравнения количества движения для речных русел, имеющих боковой приток, имеет вид:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{g}{\omega} \cdot \frac{\partial(\overline{H} \cdot \omega)}{\partial x} + \frac{V \cdot q}{\omega} = g(I - I_f), \quad (3)$$

где:  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\overline{H}$  – расстояние от водной поверхности до центра тяжести водного сечения (в других формулах вместо него используют среднюю по сечению глубину потока);

$I$  – уклон дна реки, м/м;

$I_f$  – гидравлический градиент (уклон трения),

$$I_f = \frac{Q^2}{K^2}$$

$K = C\omega\sqrt{R_h}$  – пропускная способность русла, определяемая гидравлическим радиусом (отношением площади живого сечения к смоченному периметру) -  $R_h$ , площадью живого сечения  $\omega$  и коэффициентом пропорциональности  $C$  (скоростной коэффициент Шези), связанного со скоростью движения потока, а также шероховатостью русла.

Уравнение неразрывности (1)-(2), переписанное в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} + q \quad (4)$$

в конечно-разностной интерпретации представляет собой уравнение руслового баланса участка  $\Delta x$ :

$$\frac{dW}{dt} = -\Delta Q + q \cdot \Delta x \quad (5)$$

Уравнение (3), если имеются достаточные данные о гидравлических параметрах русла на основе многолетних наблюдений или специально выполненных инструментальных измерений, может быть заменено взаимосвязью  $\omega = f(Q, x)$  (кривая русловой емкости) и тогда уравнение неразрывности, если подставить в него данную зависимость, даст искомое решение с приемлемой степенью достоверности.

Если существует однозначная взаимосвязь  $\omega = f(Q, x)$  или  $Q = \varphi(\omega, x)$ , то уравнение неразрывности в форме (1), (2) или (4) называют уравнением кинематической волны (или уравнением сохранения массы), что позволяет использовать модели руслового баланса в расчетах неустановившегося потока в русле с учетом специально подобранного соотношения конечных интервалов  $\Delta x$  и  $\Delta t$  без существенной потери точности.

## *Численная реализация модели распространения неустановившегося потока на участке влияния сброса Зеленчукской ГЭС*

Линейная расчетная схема рассматриваемого участка представлена выше на рис.2.

В качестве начального условия заданы параметры равномерного установившегося потока. Он описывается расходом, вычисляемым на основе данных текущего наблюдения за расходами в створе водпоста с. им. К.Хетагурова, пересчитанного с учетом площади водосбора в каждый из расчетных створов 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Таким образом, выделяется всего 7 расчетных створов и 6 расчетных участков, в которых рассчитывается трансформация входного потока, поступающего в створе № 0 (место сброса Зеленчукской ГЭС).

Если поток на начальный момент расчета является неустановившимся, то следует задать индивидуальные значения расходов для всех створов по данным предыдущего расчета или известные (предположительные) значения.

Считается, что если поток установившийся, то расходы в створах участка одинаковые и отличаются лишь на поправку, связанную с незначительным увеличением водосборной площади участков.

В качестве граничных условий задается в верхнем створе № 0 значения поступающих расходов по р. Кубань (по в/п с. им. К.Хетагурова с поправкой на площадь водосбора) плюс расход, сбрасываемый Зеленчукской ГЭС.

В нижнем створе для каждого  $t$  задаются расходы попусков в р.Кубань плюс водозабор в БСК.

Поскольку не всегда имеются детальные морфометрические параметры русел рек, используются усредненные характеристики для участков на основе имеющихся морфометрических данных. Таким образом, весь участок разбит на «характерные» участки в пределах, которых считается, что морфометрические характеристики неизменны. При этом для отпавного створа № 0 гидрограф задается в соответствии с текущей гидрологической обстановкой и планируемыми расходами сброса Зеленчукской ГЭС:

$$Q_{0t} = Q_0 + q_t \quad (6)$$

где:  $Q_{0t}$  – гидрограф в исходном створе № 0, в интервалы  $0 \div t$  ;

$Q_0$  – естественный гидрограф поступающий к створе № 0, во все интервалы  $0 \div t$  (т.к. рассматривается короткий период продолжительностью до одних суток, то он считается неизменным);

$q_0, q_1, q_2, \dots, q_t$  - планируемые сбросы Зеленчукской ГЭС в расчетные интервалы времени  $0 \div t$ , м<sup>3</sup>/с

Далее рассчитывается трансформация стока на первом участке и выходной гидрограф, который в свою очередь, служит входным гидрографом для второго участка и т.д. Такой алгоритм позволяет существенно упростить расчет и избежать многих математических и вычислительных трудностей.

Для каждого «характерного» участка решается уравнение кинематической волны с учетом согласования решения по известным для данного участка морфометрическим и уклонным характеристикам, шероховатости и составленного продольного профиля, на основе которых построены аналитические зависимости в виде кусочно-непрерывных кривых:

$Q(H)$  – зависимость расхода в створе от уровня;

$H_{cp}(Q)$  – зависимость среднего уровня воды от расхода в створе;

$w(Q)$  – зависимость живого сечения от расхода в створе;

$H(Q)$  – зависимость абсолютной отметки уровня от расхода в створе;

$Q(w)$  – зависимость расхода от площади поперечного сечения.

Кроме того, для Усть-Джегутинского водохранилища составлены поперечные профили для более точного учета распределения объема водохранилища по длине при расчете динамической емкости в условиях поступления неустановившихся расходов во входном створе. Общие характеристики водохранилища описываются с помощью составленных батиграфических кривых:

$F(H)$  – зависимость площади зеркала водохранилища от уровня у плотины;

$W(H)$  – зависимость объема водохранилища от уровня у плотины;

$H(W)$  – зависимость уровня в водохранилище от объема наполнения.

Расчетный временной интервал  $\Delta t$  выбирается исходя из длины расчетного участка  $\Delta x$  с учетом времени добегания расхода  $\tau$  при данном расходе или уровне на участке, таким образом, чтобы  $\Delta t$  было близко к нему, но при этом  $\Delta t \leq \tau$ . В противном случае расчет по формуле кинематической волны дает искаженные результаты – возникает как бы эффект подпертого бьефа со стороны нижерасположенного створа.

С другой стороны,  $\Delta t$  задается экспериментатором исходя из интересующего его дробления всего расчетного интервала  $T$ . Если устанавливается крупность интервала большая, чем время добегания расхода в соответствии со средней скоростью движения потока на участке, то расчет выполняется для более мелкого интервала для усредненных данных, а затем полученный результат обобщается для установленного более крупного.

Конечный результат расчетов по «характерным» участкам обобщается для основных 4-створов и Усть-Джегутинского водохранилища для уровней у водозабора БСК.

Алгоритм расчета состоит в следующем:

1. Рассчитываем гидрограф  $Q_{i,t}$  в створе  $i$  для всех расчетных интервалов времени  $t = 0, 1 \dots T$  на основе входного гидрографа  $Q_{i-1,t}$ . Для первого створа таковым является граничный гидрограф,

определяемый по формуле (6).

2. Расчет выполняем для рассматриваемого участка для каждого отдельного интервала времени  $t$  путем решения уравнения распространения потока (кинематической волны) от верхнего створа участка к нижнему в форме (5), в результате чего, определяем расход и уровень в конце текущего расчетного интервала времени.

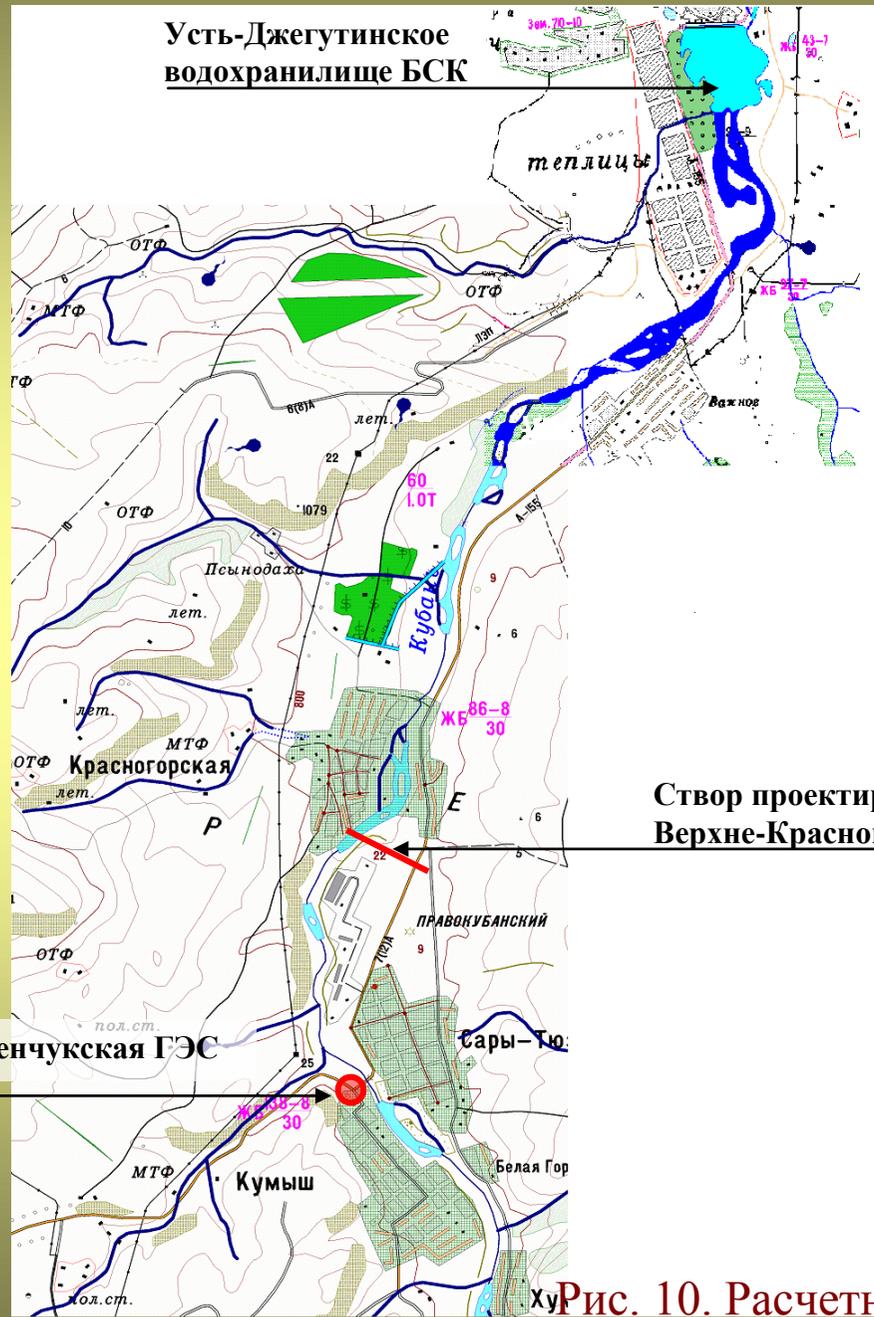
3. Согласно формулам гидравлической связи определяем остальные гидравлические характеристики с учетом проверочных связей. При этом определяем невязку, возникающую при расчете среднего уровня в нижнем створе участка. С учетом этого делаем серию итеративных уточняющих расчетов, в результате чего определяем для рассматриваемого створа окончательные величины расхода и уровня в конце интервала  $t$  (и соответственно на начало интервала  $t+1$ ):

$$Q_{i,(t+1)}, H_{i,(t+1)}.$$

4. На следующем интервале расчета  $t+1$  полученное на предыдущем временном шаге  $Q_{i,t+1}$ , считаем нижним граничным расходом, а верхним граничным расходом -  $Q_{(i-1)(t+1)}$  и продолжаем расчет согласно предыдущим пунктам 2 и 3 до тех пор, пока не будут исчерпаны все интервалы по времени.

5. Расчетную последовательность 1-4 выполняем последовательно для всех створов и участков вниз по течению. По окончании расчета принимаем полученные расчетные гидрографы и соответствующие им уровни в створах в качестве искомого решения для нахождения расходов и уровней.

Алгоритм такого расчета реализован в виде программы для ПЭВМ и использован для разработки диспетчерских правил управления объединенной водохозяйственной системой БСК и Зеленчукской ГЭС и создания АРМ.



Створ проектируемой  
Верхне-Красногорской ГЭС

Зеленчукская ГЭС

Рис. 10. Расчетная схема участка р. Кубань

