

Константин Иорданишвили, Ирина Иорданишвили,
Инга Иремашвили, Марине Мгебришвили,
Нодар Канделаки

Особенности инженерно-экологических проблем горных и предгорных водохранилищ



Тбилиси
2025

Министерство образования, науки и молодежи Грузии
Национальный научный фонд Грузии имени Шота Руставели
Институт водного хозяйства имени Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета



საქართველოს მანათლებლისა
და მეცნიერების სამინისტრო



შოთა რუსთაველის ეროვნული
სამეცნიერო ფონდი
SHOTA RUSTAVELI NATIONAL
SCIENCE FOUNDATION



Константин Иорданишвили, Ирина Иорданишвили,
Инга Иремашвили, Марине Мгебришвили,
Нодар Канделаки

Особенности инженерно-экологических
проблем горных и предгорных водохранилищ

Издательство «Сачино»

Тбилиси

2025

UDC (უკჯ) 627.8

И-756

В монографии рассматриваются особенности географических, технических, гидрологических и экологических показателей горных и предгорных водохранилищ Грузии. Материал представлен на основе анализа и обобщения наблюдений, исследований и результатов, полученных авторами на горных и предгорных водохранилищах Грузии за последние 50 лет. Рассматриваются вопросы необходимости строительства горных водохранилищ, их использования в народном хозяйстве и воздействия на окружающую среду. Проведена классификация водохранилищ с оценкой их качества воды, хозяйственного и социального значения.

Работа предназначена для бакалавров, магистров, научных и инженерно-технических работников гидротехники.

Авторы монографии выражают особую признательность академику Национальной Академии наук Грузии Гиви Гавардашвили за проделанную им работу при редактировании рукописи и ряд полезных замечаний.

Монография одобрена редакционно-издательским советом научно-учебно-методической литературы Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета (протокол заседания №8, 19 сентября 2025 г.).

Монография издана при финансовой поддержке Национального научного фонда Грузии имени Шота Руставели (номер гранта FR-21-2942).

Руководитель грантового проекта – Константин Иорданишвили, кандидат технических наук

Научный редактор – Гиви Гавардашвили, академик Национальной научной академии Грузии, доктор технических наук, профессор

Рецензенты:

П. Тугуши – директор ООО «ГИДРО-2020», кандидат технических наук

Л. Джавахишвили – главный специалист АО «ГРУЗГИПРОВОДХОЗ», кандидат технических наук

© 2025 Константин Иорданишвили, Ирина Иорданишвили, Инга Ирешашвили, Марине Мгебришвили, Нодар Канделаки

Издательство «Сачино», 2025

ISBN 978-9941-9918-5-1

От редактора

На основе исследований авторами монографии «Особенности инженерно-экологических проблем горных и предгорных водохранилищ» проведена научная оценка основных признаков и комплекса проблем горных водохранилищ. Рассмотрены вопросы создания водохранилищ в горных регионах, их использования и воздействия на окружающую среду. Приведена классификация водохранилищ Грузии, динамика и прогнозирование седиментационно-абразионных процессов; разработана и оценена эффективность волногашения новых берегозащитных конструкций в гидравлической лаборатории Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава грузинского Технического университета.

Представлена рациональная методика проведения моделирования гидравлических процессов; рассмотрен системный анализ факторов, влияющих на окружающую среду с выявлением их доминирования.

Издание предназначено для научных и технических специалистов, молодых ученых и инженеров-гидротехников.

Научный редактор: Гиви Гавардашвили, академик Национальной научной академии Грузии, доктор технических наук, профессор

ПРЕДИСЛОВИЕ

На территории Грузии, площадь которой всего 69 700 км², расположены 26 060 рек, 856 озер, 330 оросительных систем и 500 оросительных каналов, 49 типов почв, 2 400 минеральных лечебных источников, 2 718 тыс га леса, 594 место расположений инертных ресурсов, 130 млн т бентонита, 33 месторождений барита, 13 300 видов флоры, 80 млрд т марганца, 8 000-летняя история вина, 100 видов млекопитающих, 330 видов птиц, 160 видов рыб, 5 500-летняя история меда, 1 000-летняя история царской фамилии Багратионов, 3000-летняя история государственности и почти 2 000-летняя история христианства, в Грузии 51 водохранилищ (общим объемом воды 3,482 млн м³).

Водоохранилища – эффективный способ борьбы с наводнениями и оползнями, регулирования водных ресурсов, развития гидроэнергетики, орошения и водоснабжения населенных пунктов, развития рекреации.

Создание водохранилищ обуславливает возникновение новой водной экосистемы. Изучение «водохранилищной экосистемы» можно разделить на четыре этапа: 1) технико-экономическое обоснование строительства водохранилищной системы; 2) составление проекта и строительство; 3) заполнение водохранилища водой (на этом этапе начинается неустойчивость экосистемы); 4) экологическая неопределенность экосистемы.

Целью авторов монографии является рассмотрение горных и предгорных водохранилищ Грузии как географические природно-технические объекты, являющиеся неотъемлемой частью ландшафта страны и одним из основных элементов национального богатства. Анализ условий эксплуатации горных водохранилищ и их воздействия на окружающую среду показал их существенное отличие от равнинных водохранилищ. Эти различия, в основном, объясняются генезисом гидрологических показателей, спецификой и особенностью формирования водной массы и т. д. Эти различия приводят к необходимости изучения развития внутриводоёмных процессов в горных водохранилищах. Основные условия и факторы этих процессов следующие:

- малый объем водных масс и малая площадь водохранилищ приводят к быстрому развитию и затуханию поверхностных волн, что способствует значительной изменчивости параметров и трудности прогнозирования их развития;
- неустойчивость уровня режима водохранилищ способствует резкой смене волнового режима во времени;
- резкое изменение глубины в прибрежной зоне определяет интенсивность развития волновой трансформации;
- специфика ветрового режима определяет изменение волновых характеристик во времени и направления ветра.

Несмотря на то, что водохранилища являются рукотворными объектами, они рассматриваются как природные объекты, в которых происходят процессы замерзания, размывов в прибрежной зоне, фильтрации, затопления и подтопления. Поэтому изучение и прогнозирование всех этих процессов является важной задачей познания природы при

решении вопросов развития гидроэнергетики, ирригации и водоснабжения. В монографии представлены вопросы динамики процессов в горных водохранилищах, важные и полезные для тех, кто занимается или интересуется проектированием и эксплуатацией водохранилищных систем.

Научные положения основаны на результатах анализа полевых работ, проведенных авторами, а отдельные результаты проверены в гидравлической лаборатории Института водного хозяйства имени Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета.

Несмотря на то, что по теме водохранилищ в мире опубликовано более 35 000 работ, среди научных трудов об актуальности строительства и эксплуатации горных водохранилищ можно выделить фундаментальные труды лишь академиков Ц.Е. Мирцхулава, О.Г. Натишвили и Г.Г. Сванидзе; профессоров Н.Г. Варазашвили, Г.Н. Гобечия; в настоящее время выделяются своей деятельностью в этой области академик Г.В. Гавардашвили, профессора Д.Н. Кереселидзе, Г.С. Метревели и Л. Мачавариани.

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	3
Предисловие	4
I. Фонд водохранилищ на Земле	9
II. Фонд горных и предгорных водохранилищ на Земле	13
III. Общий фонд водохранилищ Грузии	21
III.1. Фонд горных и предгорных водохранилищ Грузии	21
III.2. Эффективность использования гидроэнергетических ресурсов горных водохранилищ и их каскадов в Грузии	33
III.3. Управление гидроресурсами Грузии в условиях глобального потепления	45
III.4. Особенности проектирования и эксплуатации горных водохранилищ	58
IV. Специфика и прогноз общих положений воздействия горных водохранилищ на окружающую среду	63
IV.1. Общие положения взаимосвязи «водохранилище – окружающая среда» ...	63
IV.2. Специфика и прогноз взаимосвязи "горное водохранилище – окружающая среда"	69
IV.2.1. Специфика взаимодействия «горное водохранилище – окружающая среда»	69
IV.2.2. Анализ существующих исследований внутриводоемных процессов в водохранилищах	89
IV.2.3. Прогноз внутриводоемных процессов в горных водохранилищах	95
V. Седиментационные процессы на дне горных водохранилищ	102
V.1. Анализ существующих исследований динамики седиментационных процессов на дне водохранилищ	102
V.2. Динамика и прогноз седиментационных процессов на дне горных водохранилищ Грузии	105
VI. Абразионные процессы на берегах горных водохранилищ	130
VI.1. Анализ существующих исследований динамики абразионных процессов на берегах горных водохранилищ	130
VI.2. Исследования динамики абразионных процессов на берегах горных водохранилищ Грузии	132
VI.3. Прогноз абразионных процессов на берегах горных водохранилищ	144

VI. 3.1. Расчет верхней границы размыва абразионных берегов горных водохранилищ.....	144
VI. 3.2. Расчет нижней границы размыва абразионных берегов горных водохранилищ.....	147
VII. Формирование качества воды и процессы самоочищения в горных водохранилищах Грузии.....	153
VII.1. Формирование качества воды в водохранилищах	153
VII.2. Процессы самоочищения в горных водохранилищах.....	159
VII.3. Оценка качества воды Жинвальского и Тбилисского водохранилищ	163
VII.4. Экологическая оценка загрязнения водохранилищ	171
VIII. Методы сохранения экологического равновесия горных водохранилищ	173
VIII.1. Определение времени опорожнения и наполнения горных водохранилищ	173
VIII.2. Мероприятия против развития седиментационных процессов и общие рекомендации по очистке дна горных водохранилищ	177
VIII.3. Мероприятия для защиты от размыва абразионных берегов горных водохранилищ	182
VIII.4. Методика определения ширины береговой полосы (Б.П.) и водоохранной зоны (В.З.) горных водохранилищ	194
VIII.4.1. Общие принципы определения ширины береговой полосы (Б.П.) и водоохранной зоны (В.З.) горных водохранилищ	194
VIII.4.2. Общие принципы определения фосфорной нагрузки на водохранилище	195
VIII.4.3. Пример расчета ширины береговой полосы (Б.П.) и водоохранной зоны (В.З.) Сионского водохранилища	198
IX. Моделирование гидравлических процессов и рационализация проведения экспериментов на открытых водотоках	204
IX.1. Основные положения теории подобия гидравлических процессов на открытых водотоках	204
IX.2. Безразмерные критерии гидродинамического подобия и основные принципы моделирования	205
IX.3. Моделирование волновых процессов	208
IX.4. Рациональный метод планирования экспериментов	211
X. Методы системного анализа факторов, влияющих на окружающую среду водохранилищ	213

X.1. Теория вероятности	213
X.2. Оценка наблюдаемых ошибок	214
X.3. Оценка уязвимости факторов	215
X.4. Метод экспертной оценки факторов (Дельфи)	219
X.5. Метод факторного анализа	227
X.6. Метод распознавания образов	231
XI. Оценка и прогнозирование уязвимости основных элементов водохранилищных систем	235
XI.1. Анализ аварий и катастроф существующих плотин	235
XI.2. Оценка безопасности плотин	246
XI.3. Оценка надежности берегозащитных сооружений плотин	247
XI.4. Оценка экологической надежности периода эксплуатации водохранилищ	250
Заключение	254
Литература	256
Фотоальбом	271

I. ФОНД ВОДОХРАНИЛИЩ НА ЗЕМЛЕ

Основные показатели древнейших водохранилищ Мира приведены в табл. I.1 [Авакян А.Б., Яковлева В.Б., 1999; Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н., 2002; Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2010; Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2015; Ш. Купреишвили, П. Сичинава, З. Лобжанидзе (на грузинском языке), 2015; Jia-gin Li. W., Zhang Sh., Ndakewa КН., 2009 г.; Иванов В.М., 2012].

Первое водохранилище (Коши) было создано в Древнем Египте 3000 лет назад.

Таблица I.1

Характеристики древнейших водохранилищ и плотин в Мире

№	Название водохранилища	Река	Местонахождение	Страна	Время строительства	Параметры	Время эксплуатации	Причина выхода из строя
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Ксосхаиш (Кошиш)	Нил	На 20 км выше Мемфиса	Египет	3000 г. до нашей эры	Земляная плотина $L = 415$ м; $H = 17,5$ м.	3000 г.	Данных нет
2	Сад-эль-Кафар	Нил	В 29 км южнее Каира	Египет	2900 г. до нашей эры	Кладка из бутового камня без раствора $L = 121$ м; $H = 13$ м; $V_{пол} = 568$ тыс м ³	Один сезон	Разрушение плотины в результате катастрофы наводнения
3	Нимруд	Тигр	У г. Самрас	Ближний Восток	2500 г. до нашей эры	Каменно-набросная плотина $H = 13$ м	До VII в. новой эры	Данных нет
4	Мерис	Бассейн Нила	В 8 км к юго-западу от Каира	Египет	1800 г. до нашей эры	$V_{пол} = 1$ км ³ $L = 177$ км (длина береговой линии)	До 102 г. новой эры	Данных нет
5	Хомс (Катинах)	Нар-эль-Ас (Оронт)	с. Хомс	Сирия	1315 г. до нашей эры	Каменно-набросная плотина $L = 2,29$ км; $H = 7$ м	До сегодняшнего дня	–
6	Касир	Хоср	Выше г. Ниневия	Ассирия	703 г. до нашей эры	Данных нет	–	–
7	Мариб (Суд-эль-Арим)	Вади-Джан	В 64 км от г. Марибд	Йемен (Саба)	800 г. до нашей эры	Земляная плотина $L = 670$ м; $H = 11,5$ м.	До 575 г. новой эры	Прорыв в теле плотины. Окончательно разрушена в 670 г. новой эры

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	Джебел-Башиках	Хоср	У г. Ниневия	Ассирия	699 г. до нашей эры	Две плотины из квадратных каменных плит	Данных нет	–
9	Артуш-Гомели	Артуш – Гомел	Ущелье Бавиан	Ассирия	690 г. до нашей эры	Подводящий канал 56 км, облицованный каменно-известковыми плитами	Данных нет	–
10	Мургаб	Мургаб	–	Персия	600 г. до нашей эры	Три плотины	До 1258 г. новой эры	Разрушена
11	Карналб	Албарегас	–	Иберия (Испания)	II в. до нашей эры	Водоохранилище $V_{пол} = 10$ млн м ³	До сегодняшнего дня	–
12	Савех	Паврехан	–	Персия	880 г. нашей эры	Каменно-набросная плотина $L=120$ м; $H=40$ м	100 лет	Разрушена катастрофическим наводнением
13	Банде-Эмир	–	В районе г. Шираз	Персия	II в. нашей эры	–	До сегодняшнего дня	–
14	Журур	–	–	Южная Америка	VII-VIII в.в. нашей эры	Водоохранилище $V_{пол}= 220$ млн м ³ , $F= 96$ км ²	До сегодняшнего дня	–

Вторая половина XX века характеризуется динамичными темпами создания водохранилищ во всем Мире. К 1950 году их общий объем увеличился в 8 раз. На современном этапе строительство объектов водного хозяйства идет быстрыми темпами во всех странах Мира (табл. I.2, рис. I.1). Увеличение объема зарегулированного стока наблюдается во всех странах Мира [И. Круашвили, И. Инашвили, М. Куправишвили, К. Бзиава (на грузинском языке), 2008]; Барабанова Е.А., 2012; Фаттулаев Г.Ю., 2000].

Таблица I.2

**Основные показатели крупнейших водохранилищ Мира
(полный объем более 50 км³, площадь зеркала более 5000 км²)**

№	Водохранилище	Страна	Река, озеро	Высота плотины, м	Объем водохранилища, км ³		Площадь зеркала поверхности, км ²		Длина водохранилища, км	Использование
					полный	полезный	общая	на мертвом уровне		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Братское	Россия	Ангара	106	169,3	48,2	5470	–	565	э, В, р, в
2	Вади-Тартар	Ирак		–	72,8	43,5	2000	–	100	В, и
3	Виктория (Ожен-Полс)	Уганда, Кения, Уганда	Виктория, Нил, озеро Виктория	31	–	204,8	76000	68000	320	э, р, и
4	Вольта (Акосомбо)	Гана	Вольта	70	198,0	90,0	8480	–	400	э, В, и, р, в
5	Гордон (Хрум)	Канада	Пис	165	70,1	37,0	1683	–	360	э, В, в
6	Гур (Эль-Мантек)	Венесуэла	Карони	136	111,2	55,0	1500	–	70	э, В
7	Зейское	Россия	Зeya	98	68,4	32,1	2419	–	225	н, э, В, р
8	Кабора-Баса	Мозамбик	Замбези	65	63,0	–	2700	–	137	э, В, в, р
9	Красноярское	Россия	Енисей	100	73,3	70,4	2000	–	388	э, л, В, н, р
10	Куйбышевское	Россия	Волга	29	58,0	34,6	6450	–	650	э, В, и, в, р
11	Ла-Гранд-2	Канада	Ла-Гранд	150	60,8	28,8	4085	–	120	э
12	Насер (Асуан)	Египет, Судан	Нил	95	157,0	74,0	5120	–	500	и, э, н, В, р
13	Иркутское	Россия	Ангара, озеро Байкал	30	–	47,6	32966	31500	700	э, В, р, в
14	Венерн	Швеция	озеро Венерн	–	–	7,2	5550	5500	140	э, в, В
15	Онежское (Верхняя Свирь)	Россия	Свирь, Онежское озеро	17	–	13,1	9930	9700	100	э, в, р, В
16	Онтарио (Ирокуе)	Канада, США	р. Св. Лаврентия, озеро Онтарио	23	–	30,0	19544	19500	310	э, В, н, в, д

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	Черчилль	Канада	Черчилль	14	32,3	28,0	5698	2849	140	э
18	Ингури (Джвари)	Грузия	Ингури	271,5	1,092	0,66	13,48	7,0	3,0	э

* В скобках указано другое название водохранилища или гидроузла.

Условные обозначения: э – энергетика; и – ирригация; н – борьба с наводнениями; в – водный транспорт; л – лесосплав; В – водоснабжение; Р – рыбное хозяйство; Д – консервация воды для других нужд.

К 2022 году на Земле насчитывается до 40 000 водохранилищ с принципиально разными параметрами, режимными характеристиками, направлением использования и воздействием на окружающую среду. В настоящее время функционирует и строится более 35 000 водохранилищ объемом более 1 млн м³, что составляет 95% от общего объема всех водохранилищ.

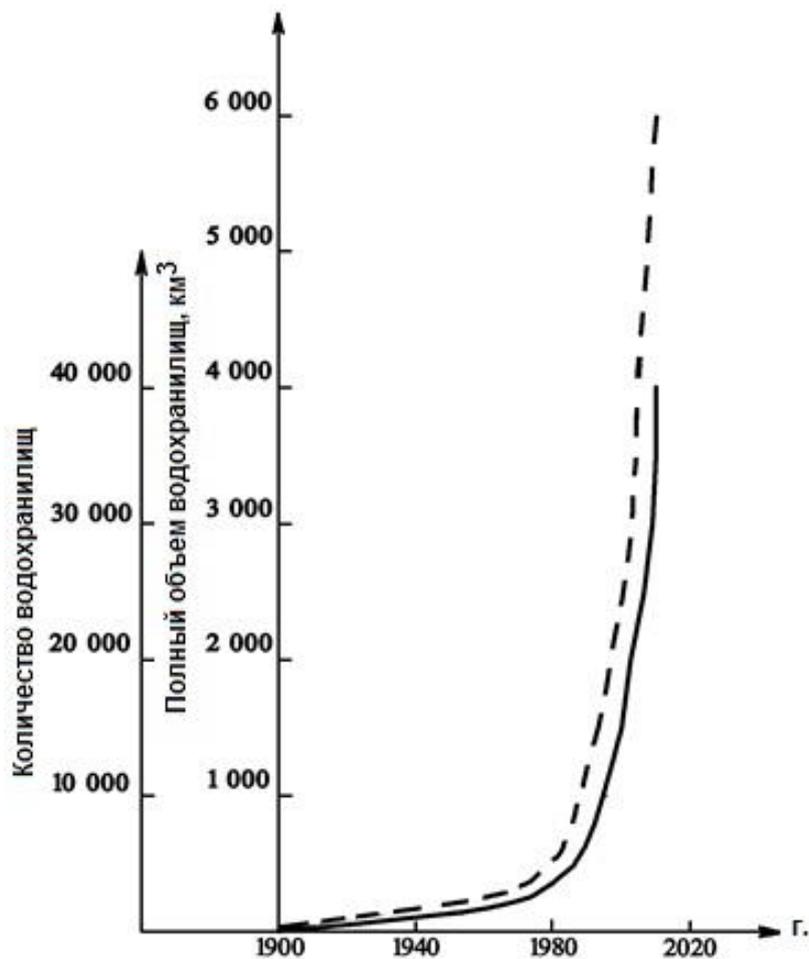


Рис. I.1. Динамика роста количества и общего объема водохранилищ объемом более 1 млн м³

— Количество водохранилищ;
 - - - Сумма полного объема водохранилищ

II. ФОНД ГОРНЫХ И ПРЕДГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ЗЕМЛЕ

Водохранилищные системы, созданные в горных и предгорных районах Мира и их основные характеристики приведены в таблице II.1.

Таблица II.1

Показатели крупнейших горных водохранилищ Мира глубиной более 100 м

№	Название водохранилища	Страна	Река, озеро	Глубина воды у плотины, м	Полный объем, км ³	Общая площадь водного зеркала, км ²	Длина водохранилища, км	Тип использования
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Рогунское	Таджикистан	Вахш	306,0	11,0	160	65	э, и, н
2	Нурекское	Таджикистан	Вахш	300,0	11,0	100	70	э, в, и
3	Барукское	Коста-Рика	Пераба	260,0	15,0	6,2	220	э
4	Мика	Анада	Колумбия	235,0	25,0	445	225	и, э, п
5	Гранд-Диксон	Швейцария	Диксанс	227,0	401,0	4	2,5	э
6	Гобинд Сагар	Индия	Саеледж	200,0	10,9	176	85	и, э, н, в
7	Поуэл	США	Колорадо	200,0	34,0	645	300	н, и, э, п
8	Эль-Кахо	Гондурас	Умуя	200,0	5,6	95	70	э, и, н
9	Дабалкам	Австрия	Дорфебах	200,0	236,0	–	–	э
10	Кебан	Турция	Ефрат	190,0	31,0	675	125	и, э
11	Токтогульское	Киргизия	Нарын	180,0	20,0	285	65	э, и, в, п
12	Ататуркское	Турция	Ефрат	175,0	48,7	138	–	э, и
13	Бекмское	Ирак	Большая Заби	170,0	12,0	–	35	и, п, э
14	Колымское	Россия	Колыма	170,0	16,0	440	150	э
15	Мид-Гувера	США	Колорадо	170,0	38,0	630	185	н, и, в, в, э
16	Маунтин-Гордон	Канада	Пис	165,0	70,0	1680	360	э, н, в
17	Итаипу	Бразилия	Парана	165,0	29,0	1350	170	э
18	Пелигре	Гаити	Артибонт	160,0	610	480	–	и, э
19	Каракайское	Турция	Ефрат	155,0	10,0	300	400	э, и
20	Магарин	Иордания	Ярмук	155,0	486,0	–	–	и, в
21	Даниэль-Джонсон	Канада	Маникуаган	154,0	142,0	1950	1575	э, в, н
22	Бгумибол	Таиланд	Пинг	150,0	15,4	320	125	э, и
23	Гури-Манеко	Венесуэла	Карона	150,0	135,0	4250	250	э
24	Ла-Гранд-2	Канада	Ла-Гранд	150,0	62,0	4085	120	э
25	Эмбаркакау	Бразилия	Паранаиба	150,0	18,0	475	68	э
26	Пос-ду-ария	Бразилия	Игуасу	145,0	8,0	195	–	э
27	Шеста	США	Сакраменто	145,0	5,6	120	55	н, и, э
28	Ангостур	Мексика	Грипалва	140,0	10,2	340	140	э, и

1	2	3	4	5	6	7	8	9
29	Инпернило	Мексика	Балсаса	140,0	12,0	400	130	э, и, н
30	Кениир	Малазия	Трештану	140,0	16,0	–	–	э
31	Кремаста	Греция	Ахилес	140,0	4,8	80	30	э, и
32	Лиуцзиас	Китай	Хуанхе	140,0	6,0	130	200	э, л, и
33	Окутадам	Япония	Тадами	140,0	600,0	10	–	э
34	Шрисалам	Индия	Кришта	135,0	8,7	755	160	и, э
35	Гордон (1974)	Австралия	Гордон	130,0	12,8	320	35	э
36	Тарбел	Индия	Инд	130,0	14,0	260	80	э, н, и
37	Кабора-Бас	Мозамбик	Замбези	127,0	65,0	2700	270	э, и, в, р
38	Банчаонен	Таиланд	Мехлонг	125,0	18,0	420	120	э, и, н
39	Биас	Индия	Биас	125,0	8,10	260	42	и, э
40	Биль-эль-Видан	Марокко	Аль-Абад	125,0	1500	1160	34	и, э
41	Бурейская	Россия	Бурей	124,0	23,0	800	150	э, н
42	Нагардженасар	Индия	Кришна	120,0	12,0	265	40	э, н, и
43	Саянская	Россия	Енисей	120,0	29,0	633	290	э, и, в, л, В
44	Утард-4	Канада	Утард	120,0	20,0	655	95	э
45	Путалеупу	Аргентина	Пут-Пу	120,0	7,0	90	–	э
46	Хаобинь	Вьетнам	Да	120,0	–	–	–	э, и
47	Ла-Гранд-4	Канада	Ла-Гранд	119,0	21,0	805	50	э
48	Мангла	Пакистан	Джелам	116,0	7,5	280	75	э, и
49	Малпасо	Мексика	Грихальва	110,0	13,0	300	80	н, э, и, в
50	Сан-Симон	Бразилия	Паранаиба	110,0	13,0	600	–	э
51	Алкантара	Испания	Тахо	110,0	3137	105	–	э, и
52	Братское	Россия	Ангара	106,0	170,0	5470	565	э, в, л, В, р
53	Гран-Кули	США	Колумбия	105,0	12,0	320	240	и, э
54	Докан	Ирак	Малая Заби	100,0	7,8	270	25	и, э
55	Зейское	Россия	Зей	100,0	69,0	2420	225	н, э, в, л, р
56	Кариба	Замбия	Замбези	100,0	161,0	4450	300	э, в, и, р, н
57	Красноярское	Россия	Енисей	100,0	74,0	2000	390	э, л, В, в, н, р
58	Нечако	Канада	Нечако	100,0	22,0	800	235	э
59	Син-Ианьское	Китай	Син-иань	100,0	22,0	580	–	э, п
60	Синпинанское	Китай	Синпинь	100,0	14,0	390	–	э, п
61	Сирикити	Таиланд	Мас Нани	100,0	11,0	680	90	э, и, п
62	Каштелу-Боло	Португалия	Зезир	100,0	1100	30	120	э, н
63	Анвалид	Иордания	Джамука	100,0	200	12,2	–	и, э
64	Бенмор	Новая Зеландия	Уаитака	100,0	2480	2000	78	э
65	Пуэбло-Виейхо	Гватемала	Чихоя	100,0	460	350	–	э

Условные обозначения: э – энергетика; и – ирригация; н – борьба с наводнениями;
л – лесосплав; В – водоснабжение; р – рекреация; т – водный транспорт;
п – аккумуляция воды для других нужд.

Создание горных водохранилищ обусловлено их значительной глубиной (Н) и малой затопляемостью территории:

- водохранилища Закавказья: Ингурское – Н = 225 м; Черкейское – Н = 215 м; Жинвальское и Сарханское – Н = 110÷115 м; Ирганайское – Н = 95 м; Мингечевирское, Сионское, Шамхорское, Ахурянское – Н = 50÷75 м;
- среднеазиатские водохранилища: Нурекское – Н = 300 м, Токтогульское – Н = 180 м, Чарвакское – Н = 170 м;
- водохранилища Сибири преимущественно долинного типа: глубина воды Саянского водохранилища Н = 220 м; Усть-Илимского, Зейского и Ханайского водохранилищ – Н = 40÷50 м.

Особый интерес представляет опыт использования водных ресурсов альпийских стран. Одна из рек Альп – р. По (Тичино) протекает по территории Италии и Швейцарии, ее гидрографическая схема представляет собой яркий пример использования водных ресурсов глубоких водохранилищ для получения электроэнергии и орошения. Массовое создание водохранилищ в Швейцарии и Австрии фиксируется с начала XX века. К 1980 году общее количество водохранилищ в этих регионах превысило 200. На территории Швейцарии (F=41,29 км²) количество водохранилищ составляет более 160, которые, в основном, расположены выше отметки ∇ 500,0 м (табл. II.2; табл. II.3; карта II.1). Здесь уже освоено до 95% потенциала речной воды, что обеспечило полную электрификацию страны и экспорт электроэнергии без развития негативных процессов. Именно строительство горных и предгорных водохранилищ способствовало снижению затрат на электроэнергию в Швейцарии, большому потоку туристов и развитию курортных зон.

Таблица II.2

Список крупных горных и предгорных водохранилищ в Швейцарии

№	Название водохранилища	Глубина водохранилища, Н, м	Год ввода в эксплуатацию	Полный объем водохранилища V _{полн} , млн м ³	Расположение водохранилища
1	2	3	4	5	6
1	Grande Dixence	285	1961	401,00	Valais/Wallis
2	Mauvoisin	250	1957	211,50	Valais/Wallis
3	L.uzzone	225	1963	108,00	Ticino
4	Locarno, Contra (Uersasco)	220	1965	105,00	Ticino
5	Emosson	180	1974	227,00	Valais/Wallis
6	Zeuzier	156	1957	51,00	Valais/Wallis
7	Göscheneralp	155	1960	76,00	Uri
8	Curnera	153	1966	41,10	Graubünden/Grigioni
9	Zervreila	151	1957	100,50	Graubünden/Grigioni
10	Moiry	148	1958	78,00	Valais/Wallis
11	Gigerwald	147	1976	35,60	St. Gallen
12	Limmern	146	1963	93,00	Glarus
13	Valle di Lei	141	1961	197,00	Graubünden/Grigioni

1	2	3	4	5	6
14	Punt dai Gall	130	1968	164,60	Graubünden/Italia
15	Sambuco	130	1956	63,00	Ticino
16	Nalps	127	1962	45,00	Graubünden/Grigioni
17	Hongrin Nord	125	1969	53,20	Vaud
18	Gebidem	122	1967	9,20	Valais/Wallis
19	Mattmark	120	1967	101,00	Valais/Wallis
20	Santa Maria	117	1968	67,30	Graubünden/Grigioni
21	Albigna	115	1959	71,00	Graubünden/Grigioni
22	Spitallamm	114	1932	101,00	Bern
23	Cavagnoli	111	1968	29,00	Ticino
24	Schräh	111	1924	150,00	Schwyz
25	Oberaar	100	1953	61,00	Bern
26	Raterichsboden	94	1950	27,00	Bern
27	(Castiletto)	91	1954	60,00	Graubünden/Grigioni
28	Hongrin Sud	90	1969	53,20	Vaud
29	Rossens	83	1947	220,00	Fribourg/Freiburg
30	Schiffenen	47	1963	65,00	Fribourg/Freiburg
31	Seeuferega	42	1932	101,00	Bern
32	In den Schlagen	33	1936	96,50	Schwyz
33	Rhodannenberg	30	1910	56,40	Glarus
34	Piora	27	1920	53,90	Ticino
35	Proz-Riond	20	1957	51,00	Valais/Wallis
36	Huhnermatt	17	1937	96,50	Schwyz

Таблица II.3

Список озер и водохранилищ в Швейцарии
по гипсометрическим признакам

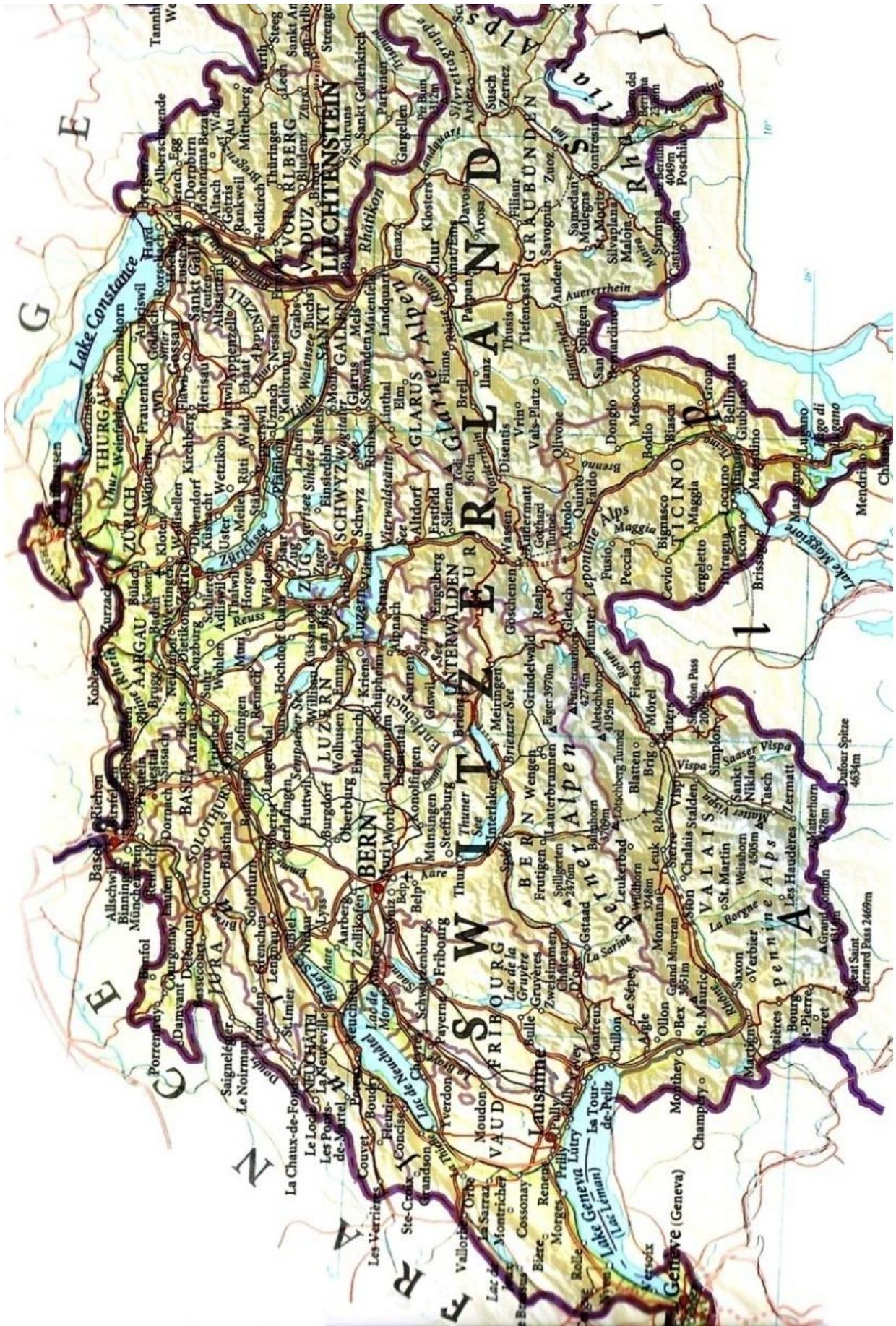
№	Тип	Местные названия	Кантоны, граничащие страны	Высота над уровнем моря ↕, м	Площадь <i>F</i> , км ²	Максимальная глубина <i>H</i> , м
1	2	3	4	5	6	7
Равнинные водохранилища ↕ < 400,0 м						
1		Lago Maggiore	Тичино, Италия	193,5	210,12	372,0
2		Ceresio, Lago di Lugano	Тичино, Италия	270,5	48,67	288,0
3	↑	Klingnauer Stausee	Аргау	318,0	1,16	8,5
4		Lac Lèman, Lac de Geneve	Вауди, Вале, Франция	372,0	580,03	310,0

1	2	3	4	5	6	7
5		Bodensene	Санкт-Галлен, Тургау, Австрия, Германия	395,6	536,00	252,0
Предгорные водохранилища \pm 401,0÷ 800,0 м						
1		Zürichsee	Санкт-Галлен, Швиц, Цюрих	405,9	88,17	136,0
2		Zugersee	Люцерн, Швиц, Цуг	413,6	38,41	198,0
3		Walensee	Кантон Гларус Санкт-Галлен	419,0	24,16	150,0
4		Lac de Biemme, Bielersee	Берн, Невшатель	429,1	39,51	74,0
5		Murtensee, Lac de Morat	Фрибург, Вауди	429,2	22,80	46,0
6		Lac de Neuchâtel, Neuenburgersee	Берн, Фрибург, Невшатель, Вауди	429,4	215,20	153,6
7		Vierwaldstättersee	Люцерн, Нидвальден, Обвальден, Швиц, Ури	433,6	113,72	214,0
8		Grefensee	Цюрих	435,1	8,17	34,0
9		Lauerzersee	Швиц	447	3,1	14,0
10		Hallwilersee	Аргау, Люцерн	448,7	10,21	47,0
11		Baldeggersee	Люцерн	463,0	5,24	66,0
12		Samersee	Обвальден	468,4	7,38	52,0
13	↑	Lago di Vogomo	Тичино	470	1,68	204,0
14	↑	Wohlensee	Берн	480	29,81	20,0
15		Sempachersee	Люцерн	503,8	14,36	87,0
16	↑	Schiffenensee, Lac de Schiffenen	Фрибург	532	4,25	38,0
17		Pfäffikersee	Цюрих	536	3,3	35,0
18		Thunersee	Берн	557,8	47,74	215,0
19		Bienzersee	Берн	563,7	3,65	260,0
20	↑	Lac de la Geuère	Фрибург	677	9,60	75,2
21	*	Lungerersee	Обвальден	688	2,01	68,0
22		Agerisee	Цуги	723,9	7,25	82,0

1	2	3	4	5	6	7
Горные водохранилища ∇ 810,0÷1200,0 м						
1	↑	Klöntalersee	Гларус	847	3,29	47,0
2		Sihisee	Швейцария	889	10,72	23,0
3	↑	Wägitalersee	Швейцария	900	4,18	65,0
4	*	Lago di Poschiavo	Граубюнден	962	1,98	85,0
5	*	Lac Brenet	Вауди	1004		34,0
Высокогорные водохранилища ∇ > 1200,0 м						
1	↑	Lac de l'Hongrin	Вауди	1255	1,60	105,0
2	↑	Lago del Sambuco	Тичино	1461	1,11	124,0
3	↑	Oeschinensee	Берн	1578	1,11	56,0
4	↑	Lago di Luzzone	Тичино	1606	1,27	125,0
5	↑	Lai da Marmorera	Грисонс	1680	1,41	65,04
6		Silvaplanenrsee, Lej da Silvaplauna	Грисонс	1790	3,1	77,04
7	↑	Göscheneralpsee	Ури	1792	1,32	106,0
8		Silsersee, Lej da Segl	Грисонс	1797	4,1	71,0
9	↑	Lafo di Livigno	Италия, Грисонс	1805	4,71	119,0
10	*	Lago Ritom	Тичино	1850	1,49	69,0
11	↑	Limmensee	Гларус	1857	1,36	146,0
12	↑	Zervreilasee	Грисонс	1862	1,61	151,0
13	↑	Grimselee	Берн	1908	2,63	100,0
14	↑	Lai da Sontga Maria	Грисонс	1908	1,77	86,0
15	↑	Lac de Salanfe	Валаис	1925	3,27	48,0
16	↑	Lac d'Emosson	Валаис	1930	1,62	161,0
19	↑	Lago di Lei	Италия, Грисонс	1931	4,12	133,0
20	↑	Lac de Mauvoisin	Валаис	1961	2,08	250,0
19	↑	Lago da l'Albigna	Грисонс	2163	1,13	108,0
20	↑	Mattmaksee	Уоллис	2197	1,76	93,0
21	*	Lago Bianco	Грисонс	2234	1,50	53,0
22	↑	Lac de Moiry	Валаис	2249	1,40	148,0
23	↑	Oberaarsee	Берн	2300	1,47	90,0
24	↑	Lac des Dix	Валаис	2365	3,65	285,0

Обозначения: ↑ – водохранилища;

* – естественные озера, используемые как водохранилища



Карта П.1. Карта водохранилищ и рек Швейцарии



Карта П.2. Карта расположения гидроэлектростанций в Норвегии

В Норвегии, территория которой составляет 324 220 км², а население – 5,3 млн человек, в эксплуатации находится более 1660 ГЭС, из них более 1000 – водохранилищные. Норвегия занимает первое место в Европе и шестое место в Мире по гидроэлектрогенерации (карта П.2).

Норвегия – страна с самыми большими запасами природного газа, использует этот ресурс внутри страны как можно меньше, поэтому 143 млрд кВт·ч приходится на гидроэнергетику. Доля использования гидроэлектроэнергии Норвегии значительно возрастает в Швеции и Финляндии.

Таким образом, строительство горных водохранилищ более эффективно. Путем строительства регулируемых водохранилищных гидроэлектростанций странам будет предоставлена возможность уменьшить и устранить энергетическую зависимость от соседних стран.

III. ОБЩИЙ ФОНД ВОДОХРАНИЛИЩ ГРУЗИИ

III.1. ФОНД ГОРНЫХ И ПРЕДГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ ГРУЗИИ

Гидросооружение – водохранилище с плотиной, целью которого является создание искусственного резервуара для сбора воды, регулирования стока и достижения "командной" высоты орошаемых земель, имеет в Грузии доисторические корни.

Первые сообщения об ирригации можно найти в I веке нашей эры. Греческий путешественник и географ Страбон писал в I веке нашей эры: «Эта страна (Грузия) орошается реками и другими водами больше, чем Вавилон и Египет». Э. Такаишвили заявил, что строительство крупных каналов в Грузии было начато во второй половине первого тысячелетия. На всех этапах развития страна охраняет оросительные системы, как крепости.

Частота гидрографической сети и горные условия расположения исторически привели к созданию мелких каналов в Грузии [И. Иорданишвили, 2010 (на грузинском языке)].

Археологические данные также подтверждают масштабное ирригационное строительство в Картли. В начале средних веков каналы возводились во всех трех долинах Шида Картли: Доглиаури, Тирифон и Мухрани. Каналы вытекали из левых притоков р. Кура (Фроне, Пца, Большая и Малая Лиахви, Меджуда, Лехура, Ксани). «Преобразование Картли» приписывают Александру Македонскому. На ранних этапах феодализма в Кахети были созданы крупные ирригационные системы (в бассейнах Иори и Алазани). Земля орошалась даже в горах, где это позволяла местность (в районе Тианети – долина Эрцос, Артаан и др.).

В IV-VI в.в. созданы оросительные системы крупных каналов в Картли, которые возводились государством и церковными епархиями. Показательно строительство Руставского, Мухранского, Гачианского, Руис-Урбнисского и других каналов.

Особое развитие мелиорация получила в период правления царицы Тамар (XII век). В этот период был возведен канал протяженностью 20 км, т.н. «Канал царицы Тамар», начало которого было у села Жинвали и доходил до Гардабанской долины. Каналом орошались – поля на левом берегу р. Арагви, верхние поля Сагурамо, Авчала и Тбилиси. По приказу царицы Тамар был прорыт Алазанский канал протяженностью 119 км. Фрагменты этих каналов сохранились до наших дней. Произведение Шота Руставели «Витязь в тигровой шкуре» подтверждает эти сообщения. История поэмы охватывает большое пространство, включающее Индию, Аравию, Персию (Хорезм) и Северный Китай (Хатаети), а также географические поселения, созданные воображением автора: Мулгазанзар (Царство Фридона), Гуланшаро (Купеческое королевство) и т.д., но везде имеется в виду Грузия. В поэме неоднократно описываются цветущие сады, которые орошались водой из водоемов (строфа 341):

**«Вижу сад – всего прекрасней, что объемлет небосвод,
Сладкозвучнее сирены слышен птичий хоровод,
Многогранные бассейны благовонных полны вод,
Бархатистыми коврами занавешен башни вход.»*)**

Во время набегов монгольских орд (XIII век) и Шах-Аббаса (XVII век) в Грузии были полностью разрушены гидротехнические сооружения. В XVIII веке известный географ, историк, картограф Вахушты Батонишвили-Багратиони в своих научных трудах впервые описал гидрологию реки Кура (Мтквари) и ее признаков, указал ее значение для развития сельского хозяйства (в те времена река носила название «Мткуари». Вахтанг VI (XVIII век) частично восстановил поврежденные каналы – Руставский, Урбнисский и Хан-канал. Вместе с ослаблением централизованной власти в Грузии пришло в упадок и создание гидротехнических сооружений. Со второй половины XIX века уже наметилась перспектива дальнейшего развития строительства гидросооружений. На основе новейших инженерных достижений по проекту английских инженеров Белла и Габби, в 1864-1867 годах была построена Мариинская (ныне Гардабанская) оросительная сеть с созданием Джандарского водохранилища, которое вскоре было заилено. В 1957 году оно было очищено и подключено к новой оросительной сети. В 1920-1941 гг. были восстановлены и возведены крупные инженерные оросительные системы: Машвельская (1924 г.), Тирифонская (1928 г.), Алазанская (1931 г.), Дигоми-I (1928 г.), Соганлугская (1936 г.).

Новый этап создания водохранилищ начался после окончания Второй мировой войны (1945 г.). Наряду с традиционными задачами регулирования стока рек решались задачи создания новых оросительных систем, водоснабжения и улучшения экологической обстановки. Начало интенсивного строительства крупных водохранилищных гидроузлов знаменуется эксплуатацией Тбилисского (1952 г.), Шаорского (1954 г.), Ткибульского (Дзевбула) (1956 г.), Гуматского (1958 г.) и ряда других водохранилищ, среди которых следует отметить такие крупные водохранилища, как Сионское (1964 г.), Храмское (1966 г.), Джварское (Ингурское) (1976 г.), Жинвальское (1985 г.) и другие.

320 рек Грузии со значительным перепадом высот могут быть использованы для гидроэнергетических целей. Потенциальная мощность рек Грузии составляет 18,2 млн кВт, что соответствует 60 млрд кВт-ч в год. 75% территории Грузии находится в горно-предгорной зоне, отличается разнообразием природно-ландшафтных и климатических зон, сложным рельефом, что обуславливает рациональное использование водных ресурсов, размещение и устройство водохранилищных систем (рис. III.1.1 табл. III.1.1–III.1.9) [И. Иорданишвили, К. Иорданишвили, 2008, 2009, 2010; Дж. Панчулидзе, Г. Метревели, 2015; М. Шавлакадзе, Г. Натрошвили, И. Иорданишвили, М. Самхарадзе, Н. Диасамидзе, 2025 (на грузинском языке)].

*) Надо полагать, что это первое упоминание о существовании искусственного водоема в Грузии XII век. Перевод поэмы на русский язык осуществлен рядом современных ученых, среди которых перевод Ш. Нуцубидзе считается самым удачным.

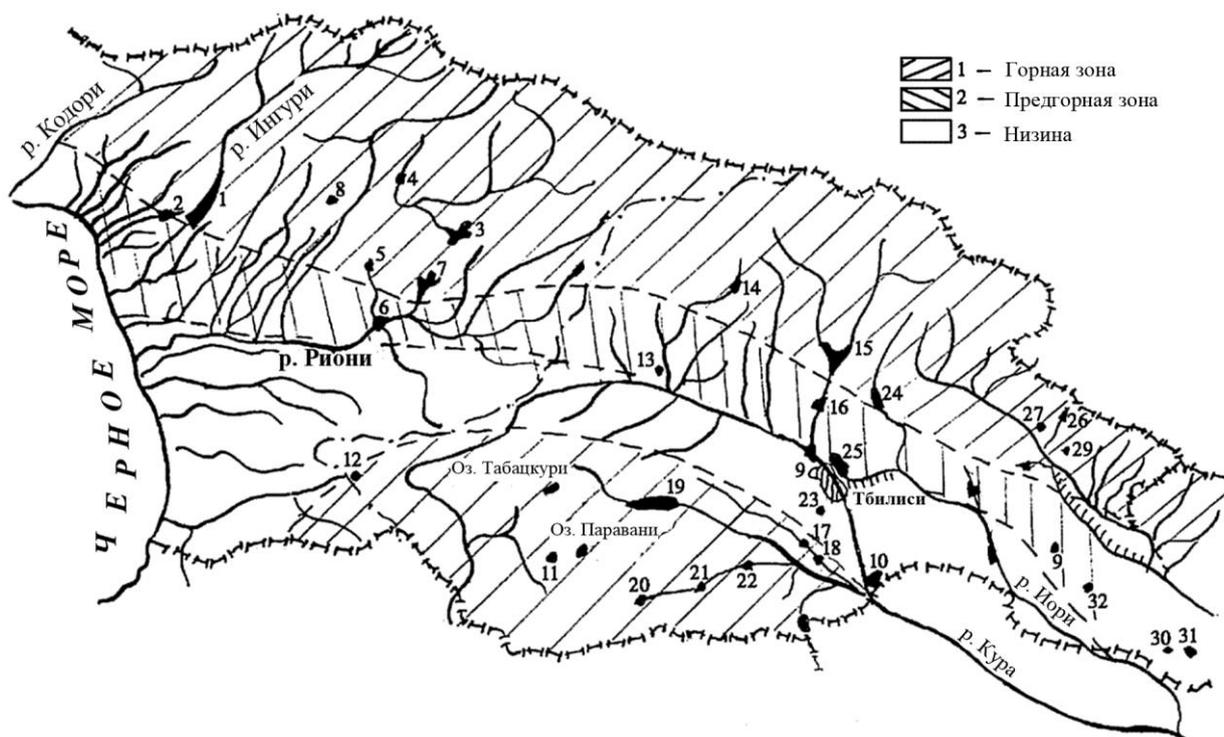


Рис. III.1.1. Расположение водохранилищ Грузии (объемом >1млн м³)
(Название водохранилищ с соответствующей нумерацией приведено в табл. III.1.4 и III.1.5)

Таблица III.1.1

Составляющие водных запасов Грузии

Тип водоснабжения	Объем воды, км ³			%
	В Восточной Грузии	В Западной Грузии	Всего в Грузии	Всего в Грузии
1	2	3	4	5
Реки	14,7	51,13	65,83	61,83
Озера	0,422	0,30	0,72	0,69
Водоохранилища	1,9929	1,4891	3,461	3,26
Ледники	5,08	18,740	23,82	22,37
Подземные воды	6,4	4,2	10,6	9,96
Болота	–	1,86	1,86	1,75
Термальные воды	0,04	0,02	0,06	0,06
Минеральные воды	0,001	0,1	0,101	0,09
Всего	28,64	77,84	106,46	100,0

Таблица III.1.2

Сводные данные о запасах речных вод Грузии

№	Область	Площадь водосбора, тыс км ²	Площадь региона, тыс км ²	Местный сток воды, км ³ /год	Сток воды с прилегающей территории, км ³ /год	Общий объем воды, км ³ /год
1	2	3	4	5	6	7
1	Грузия	99,26	69,7	56,33	9,50	65,83
2	Западная Грузия	52,60	32,42	43,69	7,44	51,13
3	Восточная Грузия	46,66	37,28	12,64	2,07	14,71
4	Абхазия	23,18	8,60	15,40	–	15,40
5	Аджария	8,60	3,0	3,42	6,48	9,90
6	Бассейн реки Кура	44,12	34,74	9,39	2,07	11,46

Таблица III.1.3.1

Особенности стока воды в водохранилища Западной Грузии

№	Название бассейна основной реки	Название водохранилища	Объем водохранилища, млн м ³		Показатели зарегулирования		Сток реки в створ водохранилищ, V _{сток} , млн м ³
			V _{полн}	V _{полез}	$\frac{V_{пол}}{W_{сток}}$	$\frac{V_{полез}}{W_{сток}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Ингури	Джварское (Ингурское)	1090,0	662,0	0,235	0,143	4640,0
2	Эрис-Цкали	Гальское	145,0	26,0	0,0298	0,0556	4850,0
3	Риони	Шаорское	90,0	87,0	0,703	0,679	128,0
4	Риони	Ткибульское	84,0	62,0	0,388	0,289	216,5
5	Риони	Гуматское	39,0	13,0	0,0077	0,00255	5100,0
6	Риони	Ладжанурское	24,6	17,6	0,0163	0,0116	1510,0
7	Риони	Варцихское	14,6	2,4	0,0017	0,00028	8600,0
8	Кухис-Цкали	Кухское	1,9	1,85	0,657	0,64	2,89
Всего в Западной Грузии			1489,1				

Таблица III.1.3.2

Особенности стока воды в водохранилищах Восточной Грузии

№	Название водохранилища	Объем водохранилища, млн м ³		Характеристики зарегулирования		Полезная водоподача (Н)
		Полный, V _{полн}	Полезный, V _{полез}	$\frac{V_{пол}}{W_{сток}}$	$\frac{V_{полез}}{W_{сток}}$	Годовой объем, млн м ³
1	2	3	4	5	6	7
1	Жинвальское (р. Арагви)	520,0	370,0	0,378	0,269	1373,7
2	Тбилиское (р.Иори)	308,0	155,0			172,5
3	Сионское (р.Иори)	325,0	300,0	0,95	0,877	333,6
4	Далис Мта (р.Иори)	140,0	120,0			110,0
5	Телетское (р.Иори)	1,6	1,2	0,333	0,25	4,75
6	Алгетское (р. Алгети)	65,0	60,0	0,50	0,461	59,7
7	Марабдинское (р. Алгети)	1,2	0,2	0,60	0,100	1,6
8	Зонкарское (р. Патара Лиахви)	40,0	39,0	0,132	0,129	105,8
9	ЗаГЭС (р. Кура)	12,0	3,0	0,0021	0,00053	4220,1
10	Дманисское (р. Дманиси)	11,0	11,0			14,8
11	Лапианское (р. Дуруджи)	3,5	3,5			4,75
Всего в Восточной Грузии		1427,3				

В настоящее время в Грузии 32 водохранилища (объемом более 1 млн м³), в том числе 24 водохранилища в Восточной Грузии и 8 водохранилищ – в Западной Грузии (табл. III.1.4; III.1.5). Всего в равнинной зоне ($\nabla < 400,0$ м) – 7, в предгорной зоне ($\nabla < 400,0 \div 800$ м) – 14, в горной зоне ($\nabla < 800,0 \div 1200$ м) – 5, в высокогорной зоне ($\nabla > 1200$ м) – 6 водохранилищ (табл. III.1.4; III.1.5; III.1.6).

Таблица III.1.4

Классификация водохранилищ Восточной Грузии по глубине

№	Согласно рис. III.1.1	Название водохранилища	Глубина, Н, м		Морфометрический индекс, $H/F \cdot 10^{-3}$	Приращение объема на глубине 1 м, $V_{пол}/H$, млн м ³ /м
			H _{макс}	H _{мин}		
1	2	3	4	5	6	7
Глубокие (H = 100 ÷ 40 м)						
1	15	Жинвальское	98,0	50,0	0,22	5,30
2	17	Алгетское	72,5	28,2	0,35	0,89
3	24	Сионское	68,6	31,4	0,086	4,73
4	14	Зонкарское (Патара Лиахви)	62,0	29,0	0,60	0,64

1	2	3	4	5	6	7
5	25	Тбилисское (проектное)	45,0	26,2	0,12	6,84
6	16	Нареквавское	40,3	18,8	0,60	0,16
Средней глубины ($H = 40 \div 12$ м)						
7	19	Храмское	25,0	9,3	0,0057	12,48
8	29	Телетцкалское	25,0	12,0	1,030	0,06
9	9	ЗаГЭС	23,0	14,0	0,007	0,52
10	32	Тавцкаройское	22,4	6,5	0,165	0,04
11	27	Лапианское (Кудигора)	20,0	12,0	0,048	0,17
Небольшой глубины ($H = 20 \div 10$ м) Цхенисцкалийское						
12	31	Кушисхевское	18,0	7,0	0,075	0,22
13	21	Пантианское	15,0	10,0	0,16	0,36
14	30	Кранчисхевское	14,0	8,0	0,24	0,09
15	22	Дманисское (Якубло)	11,5	5,6	0,016	0,95
16	13	Надарбазевское	11,0	7,0	0,025	0,74
17	12	Цхенисис-чис (Удэ)	10,5	5,9	0,12	0,14
18	26	Чальское	10,0	6,0	0,10	0,17
Наименьшей глубины ($H < 10$ м)						
19	18	Марабдинское	8,0	4,0	0,070	0,15
20	20	Мтис- Дзирское	7,2	3,7	0,017	0,46
21	10	Джандарское	7,0	4,6	0,0017	7,42
22	28	Октябрьское	8,5	4,2	0,077	0,21
23	23	Кумисское	4,7	2,0	0,0007	2,34
24	11	Зресское	3,8	1,8	0,0006	0,54

Таблица III.1.5

Классификация водохранилищ Западной Грузии по глубине

№	Согласно рис. III.1.2	Название водохранилища	Глубина, H , м		Морфометрический индекс $H/F \cdot 10^{-3}$	Приращение объема на 1 м глубины, $V_{пол}/H$, млн m^3/m
			H_{max}	H_{min}		
1	2	3	4	5	6	7
Очень глубокие ($H > 100 \div 40$ м)						
1	1	Джварское (Ингурское)	230,0	115,0	0,98	4,74
Глубокие ($H = 100 \div 40$ м)						
2	4	Ладжанурское	67,8	36,0	0,93	0,35

1	2	3	4	5	6	7
3	2	Гальское	52,0	26,0	0,086	2,78
Средней глубины ($H=40,0\div 12,0$ м)						
4	7	Ткибульское	32,0	16,0	0,0042	5,25
5	5	Гуматское	30,0	17,0	0,12	1,30
6	8	Кухское	19,4	6,3	0,13	0,10
7	3	Шаорское	12,3	6,8	0,035	5,77
Наименьшей глубины ($H < 10$ м)						
8	6	Варцихское	8,0	4,0	0,03	1,83

Таблица III.1.6

**Гипсометрические данные
действующих водохранилищ Восточной Грузии**

№	Название водохранилища	Отметки уровня, ϕ, м		Коэффициент рельефа, „α“
		НПУ, м	УМО, м	
1	2	3	4	5
Равнинная зона ϕ < 400 м				
1	Цхенис-чис	103,5	95,0	–
2	Джандарское	291,50	289,50	0,601
3	Октябрьское	341,50	334,50	0,541
Предгорная зона ϕ 400÷800 м				
4	Лапианское	429,00	417,00	0,404
5	ЗаГЭС	448,00	446,50	0,358
6	Кумисское	471,35	469,92	0,320
7	Кранчисхевское	480,00	477,60	0,441
8	Кушисхевское	490,00	475,00	0,459
9	Чальское	495,00	487,00	0,455
10	Тбилисское (проектное)	548,00	535,00	0,598
11	Марабдинское	555,00	547,00	0,368
12	Тавцкаройское	616,00	610,00	0,371
13	Телецкальское	720,00	705,00	0,402
14	Алгетское	792,50	745,00	0,349
Горная местность ϕ 800÷1200 м				
15	Жинвальское	810,00	770,00	0,384
16	Надарбазевское	862,00	855,40	0,344
17	Нареквавское	893,80	875,30	0,320

1	2	3	4	5
18	Сионское	1 068,00	1 014,00	0,259
Высокогорная зона $\nabla > 1200$ м				
19	Зонкарское (Патара Лиахви)	1 217,00	1 167,00	0,262
1	2	3	4	5
20	Дманисское	1 360,00	1 350,00	0,361
21	Пантианское	1 368,80	1 358,00	0,271
22	Храмское (Цалкское)	1 512,00	1 497,50	0,203
23	Мтис-Дзирис	1 650,00	1 644,00	0,251
24	Зресское	1 721,82	1 721,07	0,283

Таблица III.1.7

**Гипсометрические данные
действующих водохранилищ Западной Грузии**

№	Название водохранилища	Отметки уровня воды, ∇ , δ		Коэффициент горности, „ α “
		НПУ, м	УМО, м	
1	2	3	4	5
Равнинная зона $\nabla < 400$ м				
1	Варцихское	87,00	86,50	0,558
2	Гальское	100,550	97,00	0,685
3	Кухийское	170,00	158,00	0,650
4	Гуматское	200,00	96,00	0,554
Предгорная зона $\nabla 400 \div 800$ м				
5	Ладжанурское	494,00	478,00	0,352
6	Ингурское	510,00	440,00	0,404
7	Ткибульское	522,50	515,00	0,322
Горная зона $\nabla 800 \div 1200$ м				
8	Шаорское	1132,00	1124,00	0,249

В соответствии со спецификой региональных условий Грузии значение коэффициента горности местности (α) рассчитывается по следующей формуле [Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2010 (на грузинском языке)]:

$$V_{\text{пол.}} = K_W \cdot H^\alpha, \quad (\text{III.1.1})$$

где K_W – коэффициент объема водохранилища (для горных водохранилищ $K_W = 1,6 \div 2,5$); значения коэффициента ($\alpha = 0,2 \div 1,0$) по типу горности местности приведены в таблице III.1.8 и на рис. III.2.1.

Таблица III.1.8

Классификация водохранилищ по типу горности местности

№	Тип горности местности	Средние значения „а“	Пределы изменений „а“
1	2	3	4
1	равнинный	0,78	1,0÷0,65
2	озерный ^{*)}	0,51	0,64÷0,45
3	предгорный	0,37	0,44÷0,29
4	горный	0,27	0,28÷0,23
5	высокогорный	0,16	<0,23
^{*)} Тип озерности не зависит от отметки территории			

Актуальность строительства водохранилищ в горных и предгорных районах Грузии, также как и в Швейцарии обусловлена: значительными водными ресурсами и высоким энергетическим потенциалом рек; строительством водохранилищ в верховьях крупных рек; более высокими показателями эффективности их использования, низким негативным воздействием на окружающую среду, увеличением рекреации и туризма, повышением продуктивности орошаемых земель.

На основании анализа проведенных исследований установлено, что горные и предгорные водохранилища являются наиболее эффективными для регулирования речных вод, уменьшения воздействия на окружающую среду и затопления земель (что обусловлено значительным объемом и глубиной горных водохранилищ). В ближайшем будущем в Грузии возможно строительство ряда горных и предгорных водохранилищ (табл. III.1.9).

Таблица III.1.9

Перспективные водохранилища Грузии

№	Название водохранилища	Река	$V_{полн.}, \text{млн м}^3$	„а“
1	2	3	4	5
1	Тихское	Кодори	$2,50 \cdot 10^3$	0,176
2	Пшицкое	Бзипи	$1,35 \cdot 10^3$	0,278
3	Цагерское	Цхенисцкали	$1,18 \cdot 10^3$	0,306
4	Тушетское	Тушети	$0,96 \cdot 10^3$	0,176
5	Каскад Они ГЭС: I водохранилище II водохранилище	Риони Риони	$0,04 \cdot 10^3$ $0,4 \cdot 10^3$	0,280 0,280
6	Тобарское	Ингури	$0,58 \cdot 10^3$	0,231
7	Кодорское	Чхалта	$0,53 \cdot 10^3$	0,344
8	Агарское	Кура	$0,45 \cdot 10^3$	0,258
9	Бзипское	Бзипи	$0,24 \cdot 10^3$	0,336
10	Чхалтинское	Чхалта	$0,23 \cdot 10^3$	0,222
11	Цхнарское	Храми	$0,20 \cdot 10^3$	0,414
12	Тедзамское	Тедзами	$0,03 \cdot 10^3$	0,280

Протест отдельной группы населения с негативным отношением к строительству водохранилищ в Грузии, привел к уменьшению экономического развития и увеличению проблем. В настоящее время намечается строительство ряда водохранилищ – Худони ($V_{\text{полн.}} = 365,0$ млн м^3) и Ненскра ($V_{\text{полн.}} = 176,0$ млн м^3).

На территории Грузии ($F = 69,7$ км²) расположена 26 060 (табл. III.1.10; III.1.11) [Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2015 (на грузинском языке)].

Основные орошаемые площади Грузии расположены в восточной засушливой области Грузии – трансграничной р. Кура, где распределение водных ресурсов и их использование для орошения ограничивается условиями водоснабжения Грузии и соседних с ней стран.

Площадь бассейна реки Кура (198 300 км²), расположенной на территории Турции, Ирана, Восточной Грузии, Армении и Азербайджана - является примером распределения водного стока трансграничной реки Кура (рис. III.1.2, табл. III.1.10) [Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартапов М.В., 2015; Дорожка О.П., 2013; Духовный В.А., Соколов В.П., Зиганишина Д.Р., 2015; Иманов Ф.А. 2016].

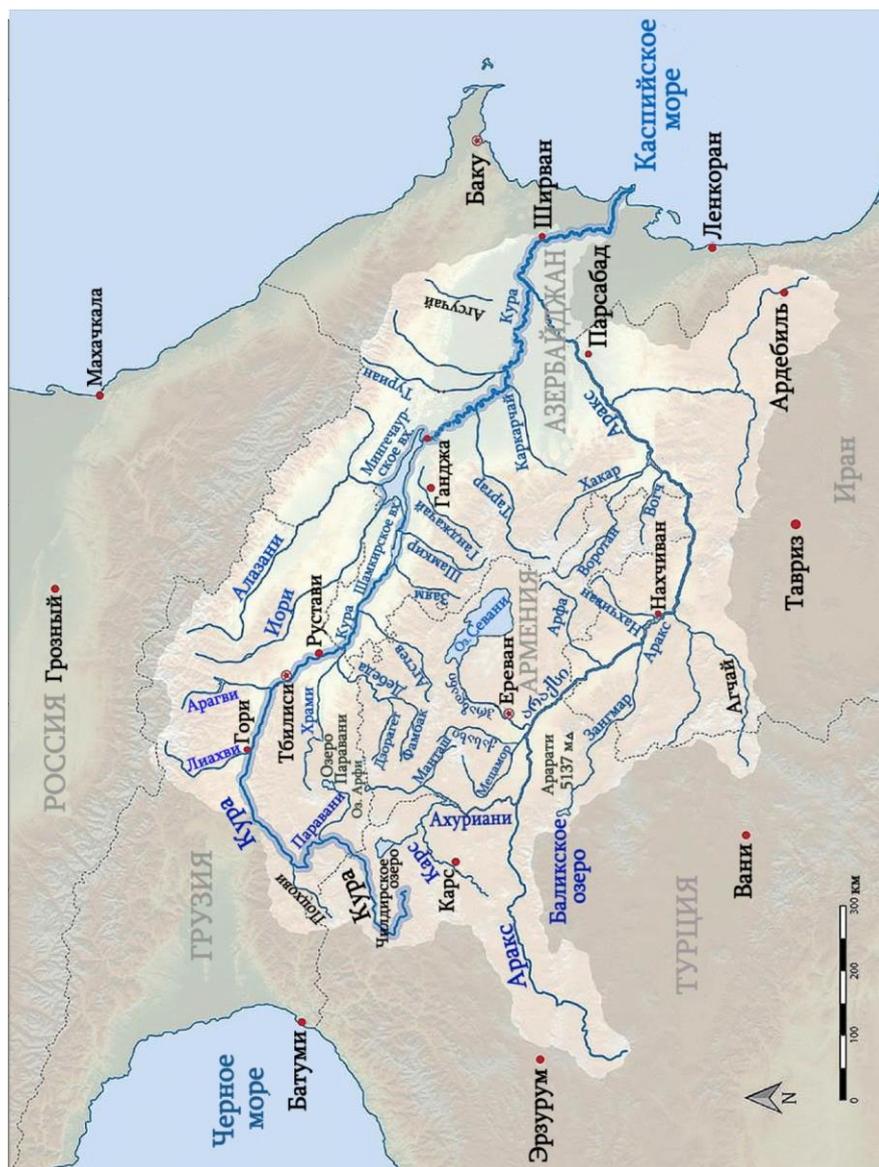


Рис. III.1.2. Водосборный бассейн р. Кура

Таблица III.1.10

Основные реки Грузии

№	Название бассейна рек	Количество рек в бассейне	№	Название бассейна рек	Количество рек в бассейне
1	2	3	4	5	6
Восточная Грузия					
1.	Кура, Храми, Алгети	4882	3.	Алазани	1803
2.	Иори	509	4.	Терек, Аса, Андаги, Аргуни, Пирикита Алазани, Гушетская Алазани	757
Всего в Восточной Грузии					7951
Западная Грузия					
1.	Квирила	2906	13.	Риони	384
2.	Супса	1428	14.	Хобис-цкали	333
3.	Хоби	1418	15.	Галидзга	317
4.	Дзирула	1386	16.	Чирухис-цкали	305
5.	Кодори	1307	17.	Амтели	274
6.	Цхенис-цкали	897	18.	Диди Эрисцкали	271
7.	Натанеби	727	19.	Гумиста	244
8.	Бзипи	614	20.	Ингури	242
9.	Техура	503	21.	Джуми	234
10.	Ханис-цкали	413	22.	Джручула	225
11.	Чолабури	402	23.	Все остальные	2945
12.	Чолоки	334			
Всего в Западной Грузии					18109
Всего в Грузии					26060

Таблица III.1.11

Водные ресурсы рек Грузии

Область	Площадь области тыс км ²	Водосборный бассейн, тыс км ²	Среднегодовой местный сток, км ³	Среднегодовой сток с соседней территории, км ³	Среднегодовой суммарный сток, км ³	%
Восточная Грузия	37,28	46,66	12,64	2,07	14,70	22,3
Западная Грузия	32,42	52,60	43,60	7,44	51,13	77,7
Всего					65,84	100

Таблица III.1.12

Распределение водных ресурсов в бассейне р. Кура

№	Река - створы	Общий сток воды, млн м ³	млн м ³				
			Азербайджан	Армения	Грузия	Иран	Турция
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Кура - государственная граница Грузии	975	–	–	–	–	975
2	Кура - граница Азербайджана	7250	–	–	6276	–	975
3	Алазани – устье	4000	1595	–	2405	–	–
4	Храми – устье	1920	–	1073	847	–	–
5	Иори – Уджарма	670	–	–	670	–	–
6	Кировобад	1590	999	591	–	–	–
7	Кура – Мингечевирское водохранилище	15430	2994	1664	10197	–	975
8	Из Карабахско-Ширванской зоны	1920	1920	–	–	–	–
9	Кура – замыкающий створ	17350	4514	1664	10197	–	975
10	Аракс – государственная граница	2854	–	330	–	–	2594
11	Аракс – Худоферин	8340	923	4257	–	535	2625
12	Аракс – гидроузел "Аракс"	5940	270	2913	–	132	2625
13	Аракс – Баграмтафа	9100	1218	4257	–	1000	2625
14	Кура – устье	26456	5732	5921	10197	1000	3600
			21850				
15	Сток в озеро Севан	827	–	827	–	–	–
16	Суммарный поверхностный сток	27277	5732	6748	10197	1000	3600
			22677				
Всего, с учетом подземных вод		30525	7952	1256	16723	1000	3600

Для эффективного использования водных ресурсов бассейна р. Кура необходимо строительство водохранилищ объемом до 3,0 км³.

Для разработки концепции распределения трансграничных водных ресурсов необходимо проанализировать банк данных по водоснабжению приграничных стран - Грузии, Армении, Азербайджана, Турции, Ирана. Для этого необходимо разработать единую методологию информации, а затем составить концепцию распределения

трансграничных вод с учетом потребности в воде и экологических проблем. Трансграничные страны должны обеспечить использование воды в соответствии с условием – кто загрязнитель – тот и платит.

III.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ КАСКАДОВ В ГРУЗИИ

Экономическое развитие стран привело к увеличению водопотребления. Водохранилища являются наиболее эффективным методом управления водными ресурсами [Метревели Г., Мачавариани Л., Гулашвили Х., 2022 (на грузинском языке)]; Losk S.P, 2017; Marco I.B., Salas I.D., 2012]. При принятии решения об использовании водных ресурсов необходимо учитывать специфику региональных особенностей территории. Актуальность этой проблемы в предгорной и горной зонах определяется многими причинами [Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Канделаки Н., 2023 (на грузинском языке), Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., 2012; Беднарук С.Е., Меговилов Ю.Г., 2017; Matchavariani L., Metreveli G., Lagidze L., Paichadze N., 2016]: среднегодовой сток воды с 1,0 км² в равнинных районах не превышает 200-300 тыс м³, в высокогорных районах – 350-500 тыс м³; при использовании высокогорных водохранилищ для обеспечения напора 1,0 м требуются потери земельных ресурсов до 0,16 км², а для обеспечения 1,0 км³ объема воды – до 35,0 км², для обеспечения этих показателей равнинных водохранилищ при напоре 1,0 м требуются потери земельных ресурсов до 142,0 км², а для обеспечения 1,0 км³ объема воды – до 138,0 км² земельных ресурсов.

Эффективное использование водных ресурсов в горных и предгорных районах Грузии зависит от двух основных факторов – частоты распределения речной сети и разницы гипсометрических высот местности. Эти факторы определяют: рост производства гидроэлектроэнергии, увеличение площади с оросительными каналами, развитие туризма и рекреации. Строительство горных водохранилищ в Грузии обусловлено значительным уклоном русла рек; большой глубиной водохранилищ, высокой прочностью и водонепроницаемостью горных пород, слагающих склоны; малой величиной площади затопления и, как правило, незначительным негативным воздействием на окружающую среду.

Реки являются основным источником потребления воды в Грузии, на территории которой протекает 26 060 рек, их основные показатели приведены в таблице III.2.1 [Иорданишвили И. К., Гавардашвили Г.В., Иремашвили И.Р., Вартанов М. В., Иорданишвили К.Т., 2018].

На территории Грузии 51 водохранилищ, 36 из которых функционируют. Расположение основных водохранилищ показано на рисунке III.1.1. Количественные средние показатели разных типов водохранилищ приведены в табл. III.2.2 [Варазашвили Н.Г., Гобечия Г. Н., 1996].

Значения показателей горности местности (а) приведены в таблице III.1.8 и на рис. III.2.1.

Таблица III.2.1

Основные показатели рек Грузии

Площадь территории, тыс км ²	Количество рек (числитель), длина (знаменатель), км					Частота речной сети, км/км ²
	Очень малые, $L < 25$ км	Малые, $L \geq 26 \div 100$ км	Средние, $L = 100 \div 500$ км	Большие, $L > 500$ км	Всего	
Восточная Грузия						
37 214	$\frac{8869}{19544}$	$\frac{77}{3\ 020}$	$\frac{4}{971}$	$\frac{1}{513}$	$\frac{7951}{23925}$	1,14
Западная Грузия						
32 434	$\frac{18036}{30946}$	$\frac{64}{2723}$	$\frac{9}{1373}$	–	$\frac{18109}{35042}$	1,07
Всего					$\frac{26060}{58967}$	

Таблица III.2.2

Основные общие показатели водохранилищ

№	Основные показатели	Обозначение	Единица измерения	Единица измерения		
				Равнинные водохранилища	Предгорные водохранилища	Горные водохранилища
1	2	3	4	5	6	7
1	Показатель рельефа	"a"		1,0÷0,6	0,6÷0,29	0,29÷0,1
2	Морфометрические показатели	H/F		$9 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$
3	Амплитуда колебаний уровня воды	A	м	<6	6÷20	> 20
4	Использование объема воды в водохранилище	$V_{\text{полн.}}/V$		0,4÷0,6	0,5÷0,7	0÷0,95
5	Увеличение объема при напоре 1 м	$V_{\text{полн.}}/H$	млн м ³ /м	500÷2000	50÷500	1,0÷50,0
6	Отношение общего объема к площади зеркала водохранилища	$V_{\text{полн.}}/F$	млн м ³ /км ²	5÷15	20÷50	50÷120
7	Отношение площади затопления к полезному объему водохранилища	$S_{\text{зат.}}/V_{\text{полез.}}$	км ² /млн м ³	120÷150	50÷110	25÷46
8	Площадь затопления при напоре 1,0 м	$S_{\text{зат.}}/H$	км ² /м	65÷250	3÷50	0,08÷0,2
9	Отношение площади затопления к орошаемой площади	$S_{\text{зат.}}/S_{\text{орош.}}$	–	0,024	0,025÷0,1	0,46÷0,9
10	Выработка гидроэлектроэнергии на единицу объема воды	$\frac{W_{\text{млн эл. эн.}}}{V_{\text{пол.}}}$	кВт ч/км ³	0,115÷0,65	0,60÷0,80	0,80÷2,0

1	2	3	4	5	6	7
11	Выработка гидроэлектроэнергии на единицу площади затопления	$\frac{W_{\text{млн эл. эн.}}}{V_{\text{зат}}}$	млрд кВт ч/км ²	0,50÷0,65	0,65÷0,80	0,80÷1,0
12	Процент площади мелководья к общей площади водного зеркала водохранилища при НПУ	$F_{\text{мелк.}}/F$	%%	15÷20	6÷10	4÷6
13	Тип водохранилища, зависящий от гипсометрии (†)	†	М	<400,0	400-800	Горные водохранилищ а † – 800-1200; высокогорные † – >1200

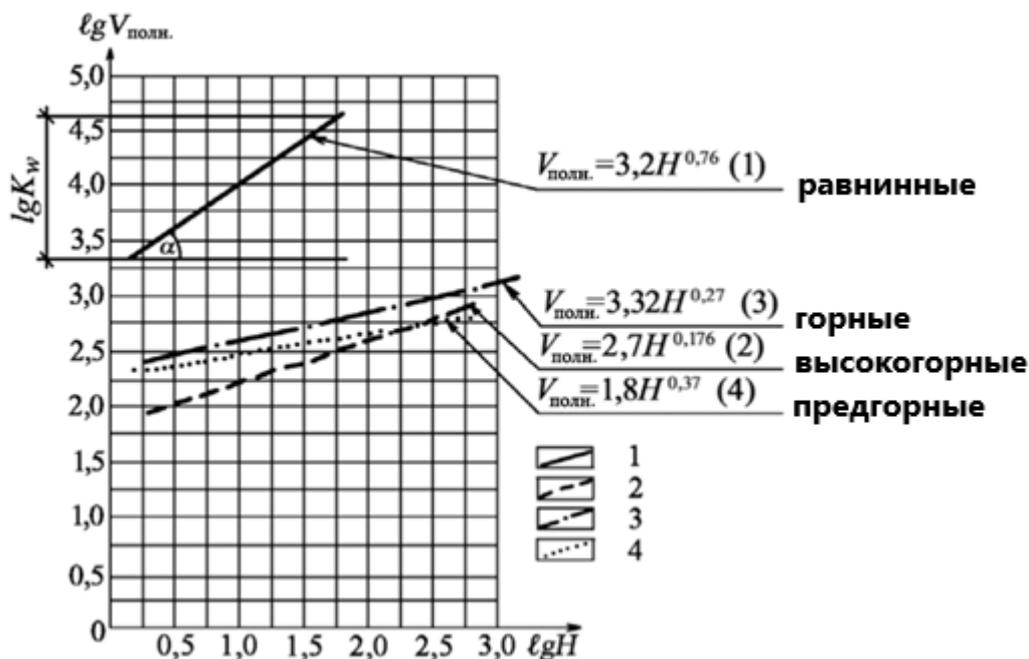


Рис. III.2.1. Зависимости полного объема водохранилища ($V_{\text{полн}}$) от глубины (H) при коэффициенте горности (a) и коэффициенте объема (K_w)

1 – кривая объемов равнинных водохранилищ ($a = 0,76$, $K_w = 3,2$); 2 – то же для предгорных водохранилищ ($a = 1,8$, $K_w = 0,37$); 3 – то же для горных водохранилищ ($a = 0,27$, $K_w = 3,32$); 4 – то же для высокогорных водохранилищ ($a = 0,176$, $K_w = 2,7$); $a = \log V_{\text{полн}} / \lg H = \text{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона, $\lg K_w$ – участок на оси ($\lg V_{\text{полн}}$).

Строительство малых и средних ГЭС на горных реках способствует экономическому развитию стран. В Грузии насчитывается до 320 рек, которые имеют значительную разницу отметок между истоком и устьем, поэтому их можно использовать в гидроэнергетических целях (схема III.2.1).



Схема III.2.1. а) гидроэлектростанция; б) ветровая электростанция; в) тепловая электростанция; г) солнечная электростанция; д) атомная электростанция

Гидропотенциальная мощность рек Грузии составляет 25,0 млн кВт, что соответствует потенциальной выработке гидроэлектроэнергии 220,0 млрд кВтч в год. К 2020 г. гидроэнергетика Грузии производила 9,691 млрд кВтч в год, это всего 5% от потенциальной выработки гидроэлектроэнергии (табл. III.2.3).

Таблица III.2.3

Фактические данные о выработке электроэнергии в Грузии

Суммарное потребление электроэнергии, млрд кВт ч/год	Местная выработка гидроэлектроэнергии, млрд кВт ч/год	Импорт электроэнергии, млрд кВт ч/год	Местная альтернативная электроэнергия, млрд кВт ч/год
13,191	9,691	2,0	1,5

Величина потенциальной энергии ветра в Грузии оценивается в 130,0 млрд кВт ч/год [Сванидзе Г.Г., Гагуа В.П., Сухишвили Э.В., 1987]. В настоящее время на территории Грузии 6 **ветряных электростанций (ВЭС)**, общая мощность которых составляет 0,018 МкВт. Для работы ВЭС необходим ветер со скоростью не менее 4-6 м/с (на высоте 10,0 м) и свободные участки земли. Необходимо учитывать неблагоприятные воздействия на окружающую среду, такие как: шумовое воздействие (до 20 Гц); эффект отражения воздуха – изменяется ветровая обстановка местности; ухудшение телевидения; воздействие на пути перелета птиц; обрыв лопастей турбины; неравномерная работа ветроустановки из-за больших перепадов силы и направления ветра; выделение значительных площадей под ветровые электростанции; увеличение ветровой эрозии. В настоящее время нет необходимости строить крупные ветряные электростанции в Грузии.

Тепловые электростанции также оказывают негативное влияние на ряд элементов природной среды: на пахотно-посевные культуры (отчуждение, загрязнение); на источники воды (изменение температуры, потери воды); загрязняется атмосфера и биосфера (газ и пыль, топливные отходы и шлаки). Так, из-за концентрации вредных веществ в атмосфере при работе тепловых электростанций в г. Рустави и Гардабани концентрация загрязнения вредными веществами в 4-12 раз превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК). Несмотря на внедрение новых технологий по сжиганию топлива и очистки атмосферы – строительство крупных тепловых электростанций в ближайшее время не ожидается (табл. III.2.4).

Создание **солнечной электроэнергетики** в Грузии осложняется затенением больших площадей, нагреванием воздуха и воды, изменением направления ветра, потребностью в большом количестве строительных материалов и т.д. Создание солнечной электроэнергии в Грузии пока носит локальный характер и его развитие вызывает сомнения. В настоящее время стоит вопрос строительства солнечной электростанции мощностью 50 МВт (табл. III.2.4).

Электрэнергию можно получить на **деривационных** и небольших оросительных каналах. Потенциальная годовая энергетическая мощность магистральных каналов Грузии достигает 0,15 млн кВт/год. Воздействие таких малых ГЭС на окружающую среду незначительно (табл. III.2.4).

Таблица III.2.4

Риск-факторы использования различных источников электроэнергии

Типы источника элэнергии	Возможные риск-факторы
Тепловые электростанции	Загрязнение атмосферы и объектов водного хозяйства
Солнечные электростанции	Аварии электроприборов из-за их возможного перегрева и воспламенения
Ветряные электростанции	Опасность отрыва лопастей турбины и отбрасывания их на расстоянии до 800,0 м при сильном ветре
Электростанции на оросительных системах	–
Гидроэлектростанции	Разрушение плотин прорывом волн

При создании гидроэлектростанций **на каскадах** водохранилищ формируются энергетические связи. При этом, верхнее водохранилище увеличивает гарантированную мощность и выработку электроэнергии не только на данной ГЭС, но и на нижних ступенях каскада. Из всего вышеизложенного следует, что создание регулирующих водохранилищ и их каскадов в верхней части реки – энергетически и экологически целесообразно. Строительство каскадов на водохранилищах считается эффективным процессом развития водного хозяйства. Типичным примером каскада, создаваемого в высокогорных районах, является Севано-Разданский каскад ГЭС на р. Раздан, в него входят 9 ГЭС, общая мощность которых составляет 900 МВт. На каскаде 17 оросительных каналов, которые орошают 100 000 га земли. Экологической проблемой этого каскада является лишь снижение уровня воды в озере Севан и изменение гидрологического режима р. Раздан. Практика строительства каскадов водохранилищ широко используется во всем Мире (табл. III.2.5).

В Грузии построен ряд каскадов ГЭС на реках: Кура, Риони, Храми, Шаори, Шаори-Ткибули, Ингури (рис. III.2.2÷III.2.6).

Таблица III.2.5

**Характеристики каскадов крупных горных водохранилищ Мира
глубиной более 100 м**

#	Река	Страна	Количество ступеней	Объем, км ³		Площадь водной поверхности, тыс км ²	Длина каскада, км	Тип использования
				полный	полезный			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Каскады Европы								
1	Тахо	Испания	11	7,6	6,0	0,3	500	и, э
2	Волга	Россия	10	143,8	71,6	20,7	3000	э, с, и, л, а
3	Влтава	Чехия	7	1,3	0,9	0,1	200	э, с, п, в
4	Днепр	Украина	6	43,8	18,4	7,0	900	э, с, и, л
5	Арда	Болгария	5	1,6	1,0	0,1	100	э, и
6	Дуэро	Испания	5	2,3	1,1	0,2	300	э, и, п, в
7	Сулак	Дагестан	4	3,6	1,7	0,1	60	э, и
Каскады Азии								
8	Евфрат	Турция, Сирия, Ирак	7	138,6	55,0	5,5	–	и, э, п
9	Нарын-Сыр-Дарья	Кыргызстан	6	30,1	21,4	1,8	250	и, э, п
10	Ангара	Россия	3	276,3	97,4	40,3	1500	э, с, л
Каскады Северной Америки								
11	Колумбия	США	15	56,3	20,0	1,5	1500	э, а, с
12	Теннесси	США	15	32,4	16,0	3,5	1290	п, э, с, в
13	Колорадо	США	11	78,2	66,6	1,8	1400	и, э, п
14	Миссури	США	9	97,6	83,4	4,9	500	п, и, э, с
15	Ла Гранд	Канада	5	168,6	68,6	9,6	650	э
16	Маникуаган	Канада	5	156,7	–	2,5	400	э
Каскады Южной Америки								
17	Рио-Гранде	Бразилия	10	51,8	–	3,3	–	э
18	Парана	Бразилия	8	118,4	–	6,2	–	э

Условные обозначения: э – энергия; с – судоходство; л – лесосплав; в – водоснабжение; и – ирригация; п – борьба с паводками; а – аккумуляция воды с комплексной целью.

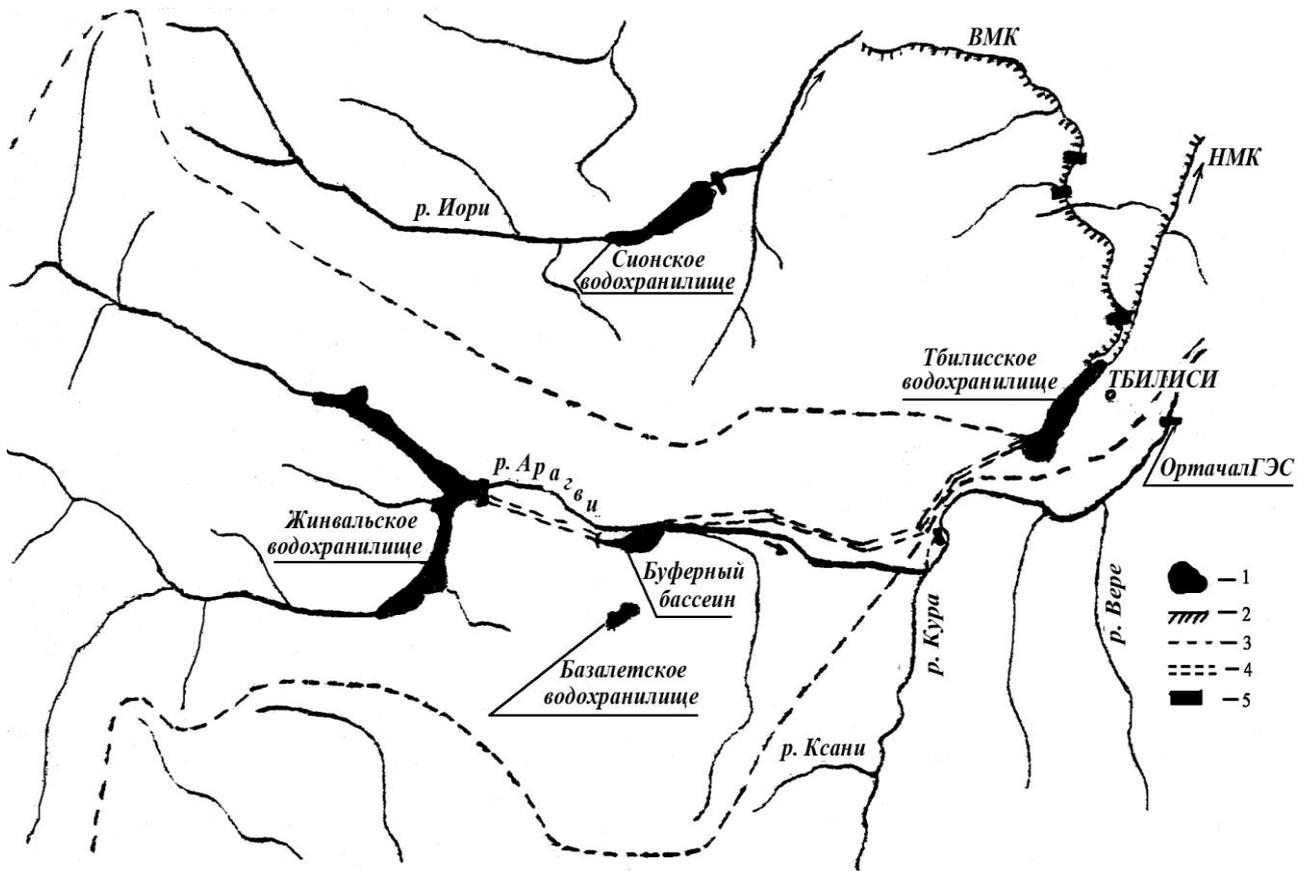


Рис. III.2.2. Схема использования р. Кура (на территории Грузии)
 1 – водохранилища; 2 – каналы; 3 – водораздел речных бассейнов;
 4 – водотоки; 5 – ГЭС.

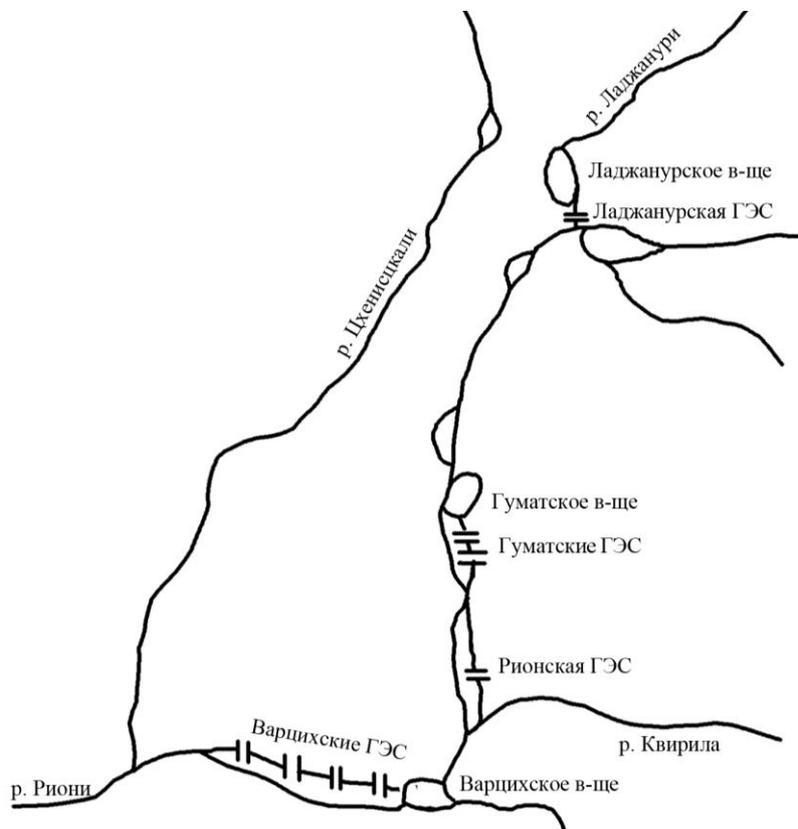


Рис. III.2.3. Схема использования р. Риони

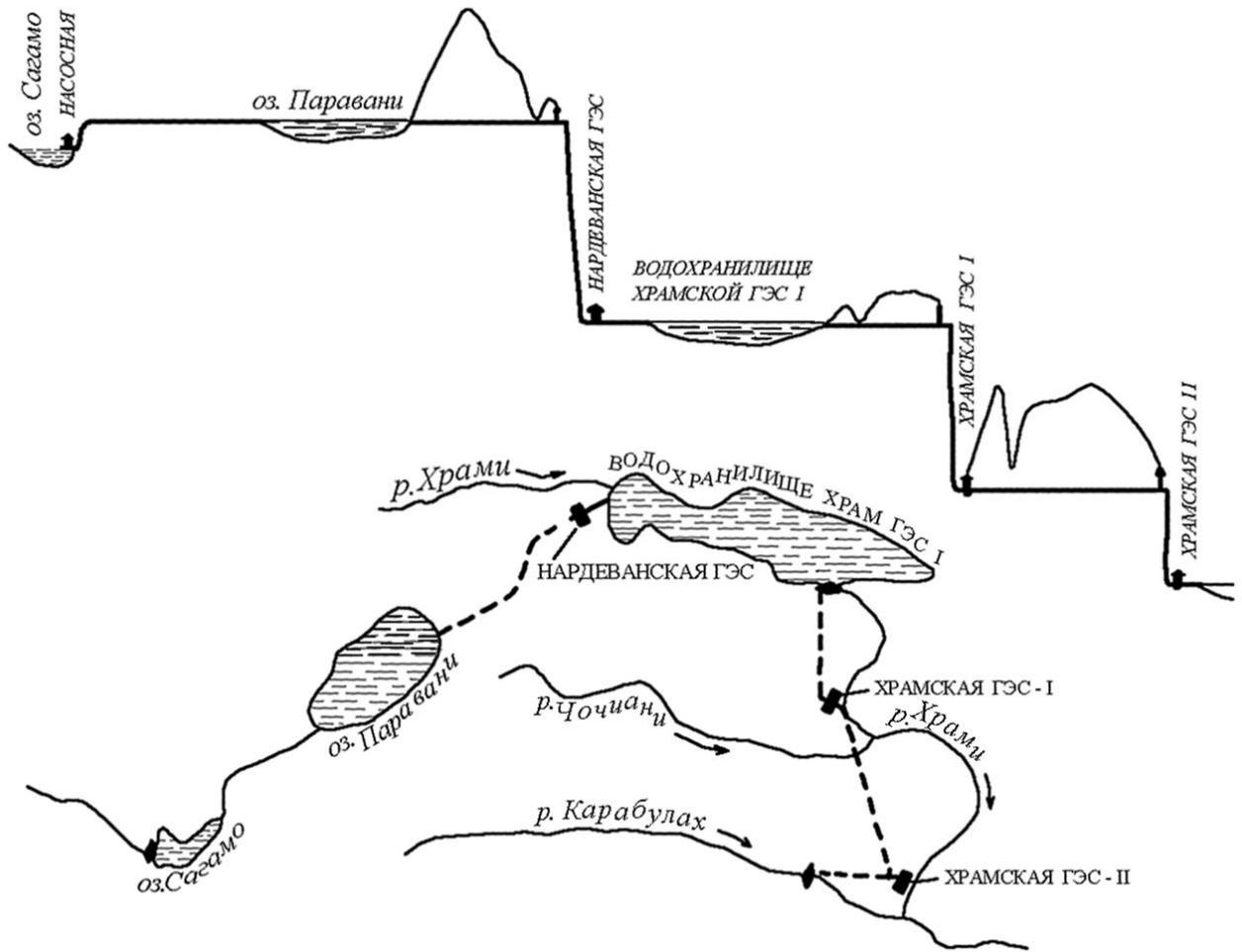


Рис. III.2.4. Схема использования р. Храми
 ■ - существующие гидроэлектростанции; □ - проектные ГЭС

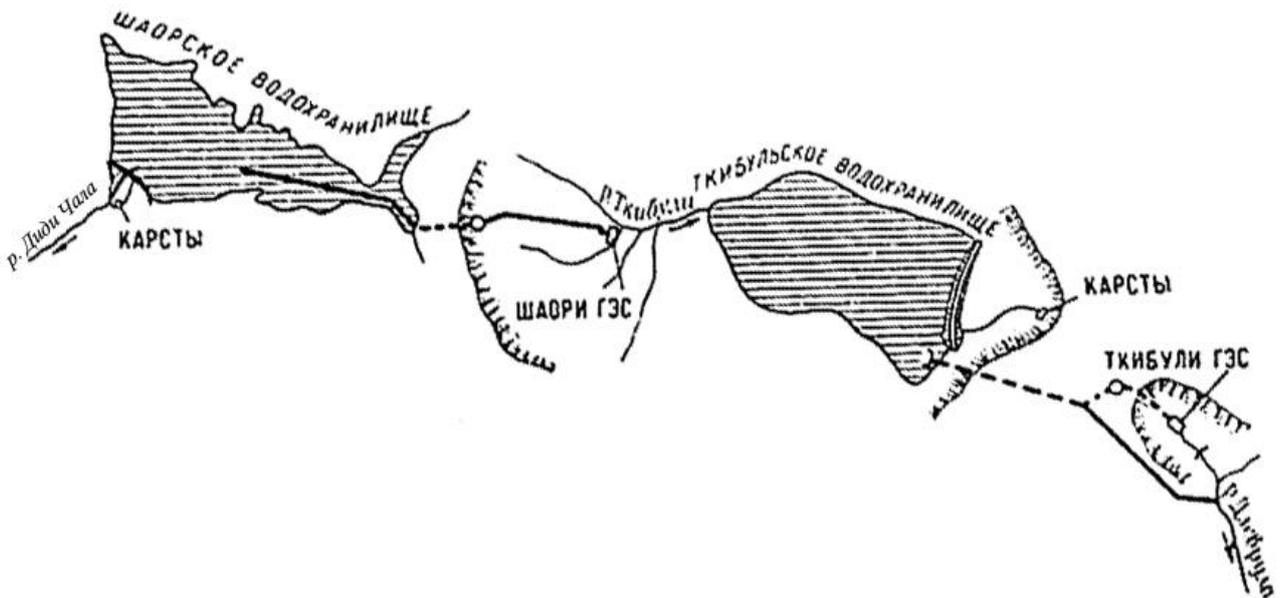
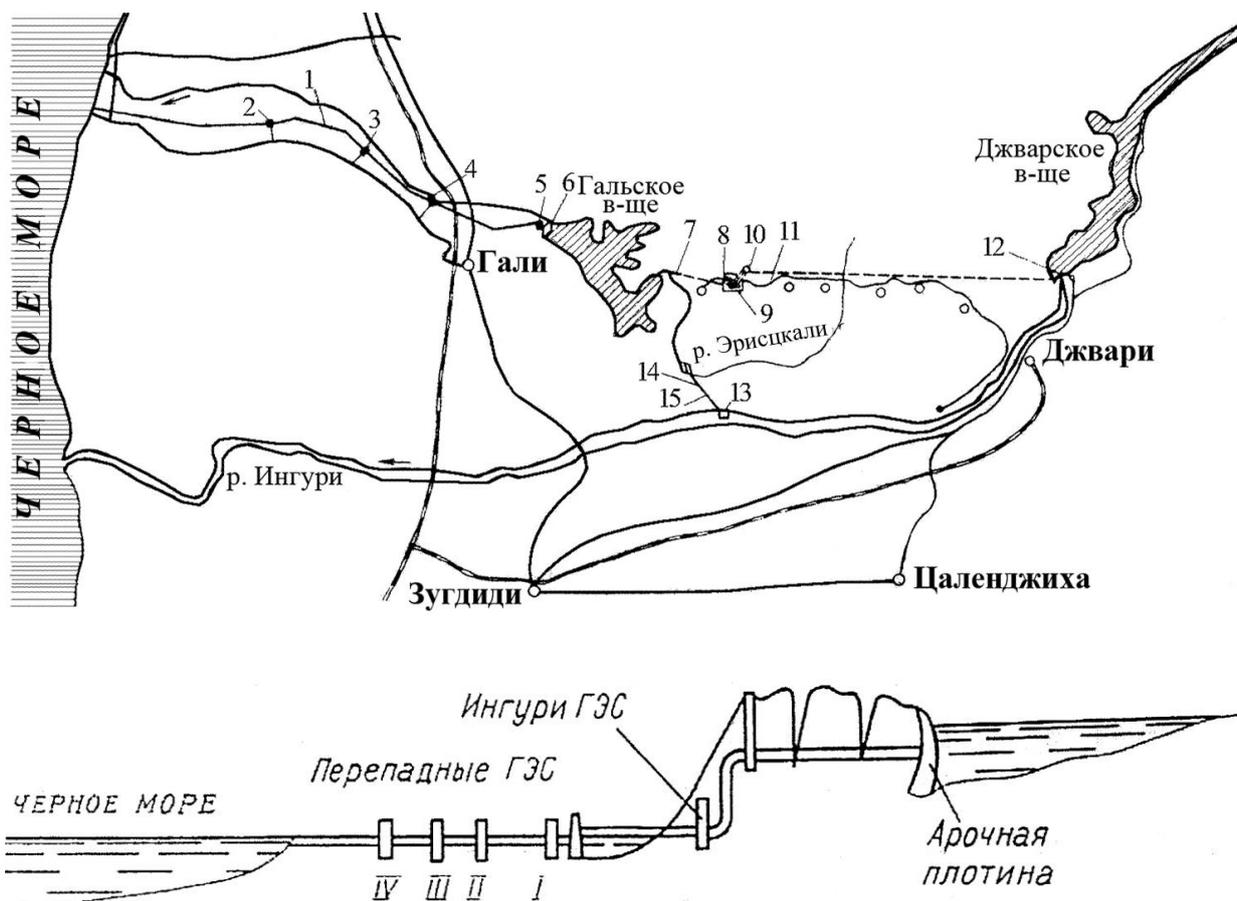


Рис. III.2.5. Схема использования р. Шаори-Ткибули



Рас. III.2.6. Общая схема расположения гидротехнических сооружений на р. Ингури
 1 – отводящий канал; 2 – Перепадная ГЭС IV; 3 – Перепадная ГЭС III; 4 – Перепадная ГЭС II;
 5 – Перепадная ГЭС I; 6 – плотина Перепадной ГЭС I; 7 – отводящий канал;
 8 – открытое распределительное устройство – 500 квт; 9 – подземное здание Ингури ГЭС;
 10 – уравнильный резервуар; 11 – деривационный тоннель; 12 – арочная плотина;
 13 – сбросные сооружения стока р. Ингури в р. Эрис-Цкали (водосливная плотина, водоприемный шлюз); 14 – каналы №1 и №2; 15 – безнапорный туннель

Таблица III.2.6

Гидроэнергетический потенциал 5 основных рек Грузии

№	Бассейн реки	Площадь водосбора, км ²	Среднегодовая потенциальная выработка электроэнергии рек, млрд кВт ч/год
1	Кура	18243	22,605
2	Риони	13418	30,556
3	Ингури	4062	21,039
4	Кодори	2036	13,509
5	Бзипи	1502	8,153
	Всего	39261	95,862

Такая концентрация гидроэлектроэнергии определяет целесообразность создания гидроэнергетической системы на этих реках. Энергетический потенциал рек Грузии меняется в зависимости от горности массива речного бассейна, при этом 80% потенциальной гидроэлектроэнергии сосредоточено в верхнем и среднем участках рек.

Что касается гидроэлектростанций, которые планируется построить, то их суммарная выработка электроэнергии может составить 11,0 млрд кВтч в год. Их ввод в эксплуатацию решит как энергетические потребности Грузии, так и возможность продажи электроэнергии (табл. III.2.7).

Таблица III.2.7

Данные перспективных гидроэлектростанций Грузии

№	Название ГЭС	Мощность, млн кВт
1	Худони ГЭС	0,700
2	Тобари ГЭС	0,600
3	Чхалта ГЭС	0,480
4	Орбели ГЭС	0,460
5	Намахвани ГЭС	0,400
6	Ненскра ГЭС	0,280
7	Они ГЭС	0,120
8	Цагери ГЭС	0,180
9	Парская ГЭС	0,140
10	Каскад ГЭС на р. Храми	0,036
Всего		3,396

В последние годы в Грузии происходят негативные соображения по поводу строительства гидроэлектростанций, которые носят совершенно необоснованный и дилетантский характер, объявлены "крестовые походы" против строительства и развития гидроэнергетики.

Анализируя практику использования энергетических ресурсов Альп, в частности Швейцарии, установлено, что 95% гидроэнергетического потенциала рек уже используется. В эксплуатации находится более 200 горных водохранилищ, на которых возведены более 450 гидроэлектростанций, а производство гидроэнергии достигает 35,0 млрд кВтч/год [Kandelaki N., Kupreishvili Sh., 2018]. Это определило полное обеспечение страны электроэнергией. Массовое строительство малых водохранилищ в Швейцарии и Австрии зафиксировано с начала XX века, строительство водохранилищ и гидроэлектростанций продолжается и по сей день. Специалисты отмечают, что эксплуатация горных водохранилищ имеет большое значение для энергообеспечения предгорий и горных районов, обогащения природных ландшафтов, расширения рекреации и т.д. Строительство водохранилищ в Швейцарии обуславливает снижение стоимости электроэнергии, увеличивает приток туристов и развитие курортных зон. В Швейцарии, территория которой почти в 2 раза меньше территории Грузии, водохранилища расположены на высоте 500 м над уровнем моря (табл. III.2.8, рис. III.2.7).

**Распределение водохранилищ Грузии и Швейцарии
по гипсометрическим значениям НПУ ($V_{\text{полн}} > 50,0$ млн м³)**

Показатели водохранилищ	Размерность показателей	Гипсометрическая отметка НПУ, † м				
		<400 м	400-1000 м	1000-1500 м	1500-2000 м	>2000м
1	2	3	4	5	6	7
Количество водохранилищ	Количество					
– Швейцария		2	11	6	24	14
– Грузия		6	17	5	3	0
Сумма полного объема водохранилищ, $\Sigma V_{\text{полн}}$						
– Швейцария	млн м ³	91,0	516,0	204,0	1475,0	1090,00
– Грузия	млн м ³	254,25	2148,68	471,6	317,38	0,0
Сумма площадей зеркала, ΣF						
– Швейцария	м ²	4,8	47,3	14,3	38,3	18,6
– Грузия	м ²	28,5	66,86	28,62	36,54	0
$\Sigma V_{\text{полезн.}} / \Sigma V_{\text{полн}}$						
– Швейцария	%	80,0	68,0	63,0	92,0	98,0
– Грузия	%	27,0	64,0	91,0	93,0	0

Общая площадь зеркала высокогорных водохранилищ Швейцарии (Гранд Диксан, Эмосон, Гепач, Замернбоден и др.) достигает 4,5 км², максимальная длина водохранилища 25 км, сработка уровня зеркала водохранилища составляет до 300 м. По мнению швейцарских исследователей воздействие горных водохранилищ на природную среду ограничено узкой полосой на побережье и участками речной долины в нижнем бьефе водохранилища. Процесс затопления берегов развит слабо. Согласно этим данным, предгорные и горные водохранилища улучшают природную среду. Например, на реке Эн построен каскад, который улучшил качество воды, уменьшил эрозию почвы и обогатил прибрежную растительность.

Во многих странах мира горные водохранилища считаются наиболее эффективными с точки зрения характеристик регулирования стока рек, а также оказывающих меньшее воздействие на окружающую среду и меньшую потерю земель при паводках. При определении эффективности горных водохранилищ особый интерес представляет практика использования гидроресурсов Альп, экспозиция территории которых идентична Восточной Грузии, а именно: обе гидросистемы расположены на одном полушарии Земли – между широтами 44°-48°, с идентичными изотермами 10°С-20°С. Направления основных горных систем Альп и Восточной Грузии, совпадают с направлением рек Кура и По – с запада на восток а их гидрологический режим идентичен (рис. III.2.7; III.2.8).

Строительство водохранилищных гидросистемы на горных реках Грузии является весьма эффективным методом управления водными ресурсами для орошения и

гидроэнергетики. Спрос на энергоресурсы в Грузии увеличивается с каждым годом, поэтому строительство гидроэлектростанций имеет важное значение для развития народного хозяйства. Грузия относится к странам, которая может обеспечить себя водой для нужд электричества и ирригации [И. Иорданишвили, М. Варганов, К. Иорданишвили, И. Иремашвили, Л. Биланишвили, 2022; И. Иорданишвили, К. Иорданишвили, Э. Хосрошвили, Г. Натрошвили, Д. Поцхверия, Л. Биланишвили, 2019 (на грузинском языке); Иорданишвили И., Иремашвили И., Иорданишвили К., Поцхверия Д., Биланишвили Л., 2016].

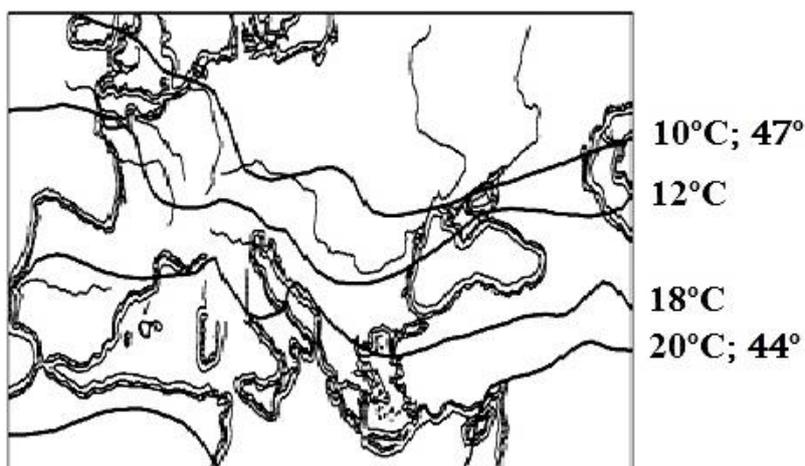


Рис. III.2.7. Значения широт и изотерм территории Грузии и Альп

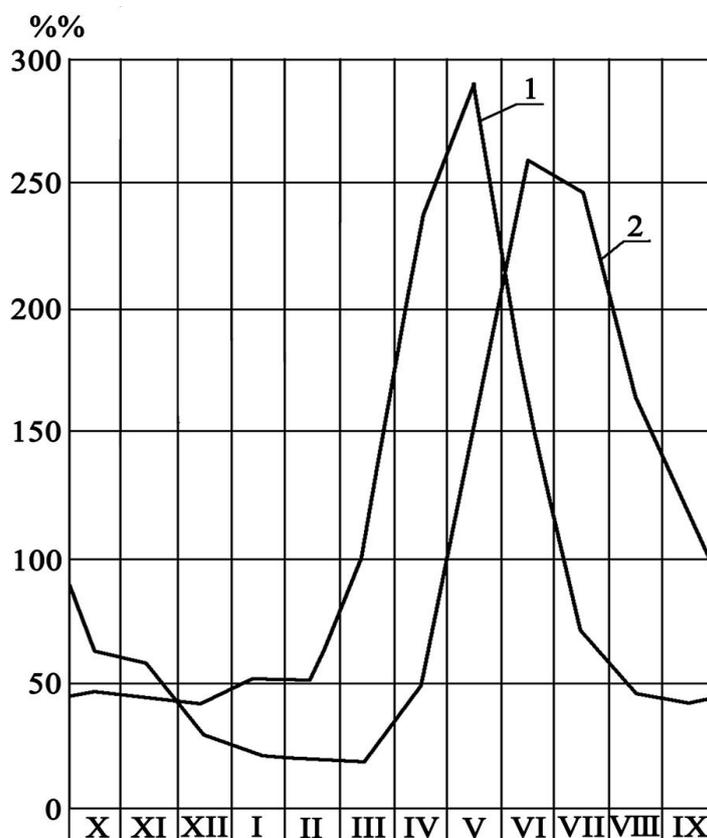


Рис. III.2.8. Среднемесячные расходы рек Кура и По (в процентах от среднегодовых расходов)
1 – Река По (близ Сент-Беллинсона); 2 – река Кура (г. Тбилиси)

Наиболее рациональной схемой получения электроэнергии в горных районах является строительство мощных гидроэлектростанций в верховьях основной реки и ее притоков, а в низовьях – строительство оросительных систем. Верхняя часть горных рек Грузии расположена в глубоких долинах, поэтому здесь желательно создавать высокие плотины, а нижнюю часть использовать для орошения.

Сравнение орогидрографических условий Швейцарии и Грузии выявило их идентичность, эффективность строительства водохранилищ в горных и предгорных условиях Грузии, что позволило снять весенние пики. Ежегодно Грузия покупает 2,0 млрд кВт электроэнергии, на которую расходуется 60,0-100,0 миллионов долларов США.

Строительство гидроэлектростанций на горных реках Грузии является экологически и экономически эффективным, так как они характеризуются гибким управлением и могут покрывать пиковые нагрузки электроэнергии.

С 2023 года в Евросоюзе введен налог на выбросы углерода, с помощью которого Европарламент будет взимать дополнительную плату с продуктов, произведенных в разных странах.

Грузия должна сосредоточиться на возобновляемых источниках энергии. При этом страна приобретет конкурентоспособность и привлечет новые инвестиции на фоне низких выбросов углерода. Если продукт производится с использованием электроэнергии, вырабатываемой на тепловых электростанциях, на этот продукт будет наложен углеродный налог, который будет переведен в специальный глобальный фонд, что повысит стоимость любого продукта, а любой продукт, произведенный с использованием гидроэлектричества, будет намного дешевле. Вводя налог на выбросы углерода, Грузия имеет наибольшую перспективу для достижения быстрого экономического развития, сокращения бедности и всеобщего процветания.

III.3. УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОРЕСУРСАМИ ГРУЗИИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

В течение последних 90 лет на Земле наблюдается глобальное потепление, которое является результатом развития различных технологий. Негативные последствия антропогенного воздействия на Землю, вызванные глобальным потеплением, это – наводнения, паводки, эрозия, опустынивание и др. [И. Иорданишвили, И. Иремашвили, К. Иорданишвили, Д. Поцхверия, Н. Канделаки, Л. Биланишвили, 2017; И. Иорданишвили, К. Иорданишвили, Э. Хосрошвили, И. Хубулава, 2008; Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Хубулава И.В., 2009; Р. Диаконидзе, 2005 (на грузинском языке); Джакели Х.И., 1986; Фатгулаев Г.Ю., 2000; Machavariani L., Lagidze L., 2012; Mehta V.M. и др., 2000; Solomon S. и др., 2011; Lagidze L. и др., 2017; Karoly D., Stott P., 2006; Brohan P. и др., 2006; Tompson D., Wallace I., 2001; Zhang R. и др., 2007; Zhenkin B., Guobin и др., 2012; Parker D. и др., 2007; Metreveli G., Metreveli M., 2001; Metreveli G., Metreveli L., 2016; Basilashvili Ts., 2011; Beritashvili B., 2011; [«Первое и Второе национальные сообщения Грузии» ... 1999, 2009 (на грузинском языке)].

Следствием глобального изменения климата считается интенсивное таяние мирового запаса льда (30 млн км³). По данным Программы ООН по окружающей среде,

представленной в Тромсе (Норвегия, 2007 г.), 40 % населения земного шара пострадает от усиленного таяния мировых запасов льда. Таяние льдов вызовет повышение уровня мирового океана, что приведет к затоплению сельскохозяйственных угодий, затоплению островов и увеличению риска обрушения сооружений различного назначения. Например, в результате таяния льдов объем ледников на территории Китая в ближайшее время уменьшится на 50 %, увеличатся заболоченные площади в Сибири и Колхиде, в результате таяния горных ледников на Кавказе запасы ледниковых вод значительно сократятся. Такой же результат ожидают запасы пресной воды в виде льда в Антарктиде и Гренландии, объем которых составляет 98% запасов воды Земли (ледниковые запасы воды в Гренландии уменьшаются на 150 км³/год). Только полное таяние Гренландских ледников вызовет повышение уровня мирового океана на 7-8 м. Лед подвержен риску в Альпах, Пиренеях, Андах и горах Кавказа, где повышение температуры на 1°С уже привело к тому, что языки ледников укорочены на 100-150 м. Подъем уровня мирового океана всего на 1 м вызовет затопление земель, на которых проживает 150 миллионов человек. В основном, это касается дельт рек Ганга, Конго, Нила, Меконга, а также территории восточного побережья Черного моря, а именно Колхида, расположенной на уровне мирового океана. Понятно, какие затраты потребуются для переселения населения на более высокие места.

Основной современной причиной таяния льдов является повышение температуры на Земле. Это связано с загрязнением атмосферы углекислым газом и метаном, а также с выделением в атмосферу тепловой энергии, что обусловлено как антропогенным воздействием, так и природными процессами (вулканы, гейзеры) и повышенной солнечной активностью [Kutuzov S. и др., 2016].

За последние 2500 лет Земля пережила несколько циклов оледенения и оттаивания [Будыко Т.И., 1980; Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., 1992; Марков Г.И., Лазуков В.А., Николаев В.Н., 1967; Флинт Р.Ф., 1963].

По разным данным, продолжительность оледенения и оттаивания различна. По единой схеме в Эоплейстоцене (250-2500 тыс лет назад) на территории Европы и Сибири было до 4 ледниковых периодов и 3 межледниковья (каждое продолжительностью 280 000 лет). В Мезоплейстоцене (75-250 тыс лет назад) – 2 оледенения и 2 межледниковья (продолжительность каждого – 45 000 лет); в Неоплейстоцене (10-75 тыс лет назад) – 2 оледенения и 2 межледниковья (продолжительность каждого 16 000 лет) (табл. III.3.1).

Таблица III.3.1

Глобальные изменения климата на Земле

2500		1000		600		250			75			10	60	Тыс. лет	
Четвертичный период (Плейстоцен)											Голоцен		Период		
Эоплейстоцен (нижний Плейстоцен)				Мезоплейстоцен (средний Плейстоцен)			Неоплейстоцен (верхний Плейстоцен)				Современный		Эпоха		
+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	процессы замерзания (+) и оттаивания (-)

Во время оледенения в северном полушарии Земли наблюдались резкие фазы похолодания. В экваториальном поясе климат менялся слабо, максимальное похолодание наблюдалось в среднем Плейстоцене, когда общая площадь ледников увеличилась в 3 раза.

В антропогенный период оледенение сопровождалось изменениями флоры и фауны, что было вызвано понижением температуры на 6-8% (рис. III.3.1). В то же время в нижних зонах Земли наблюдалось значительное увлажнение климата (плювиалы).

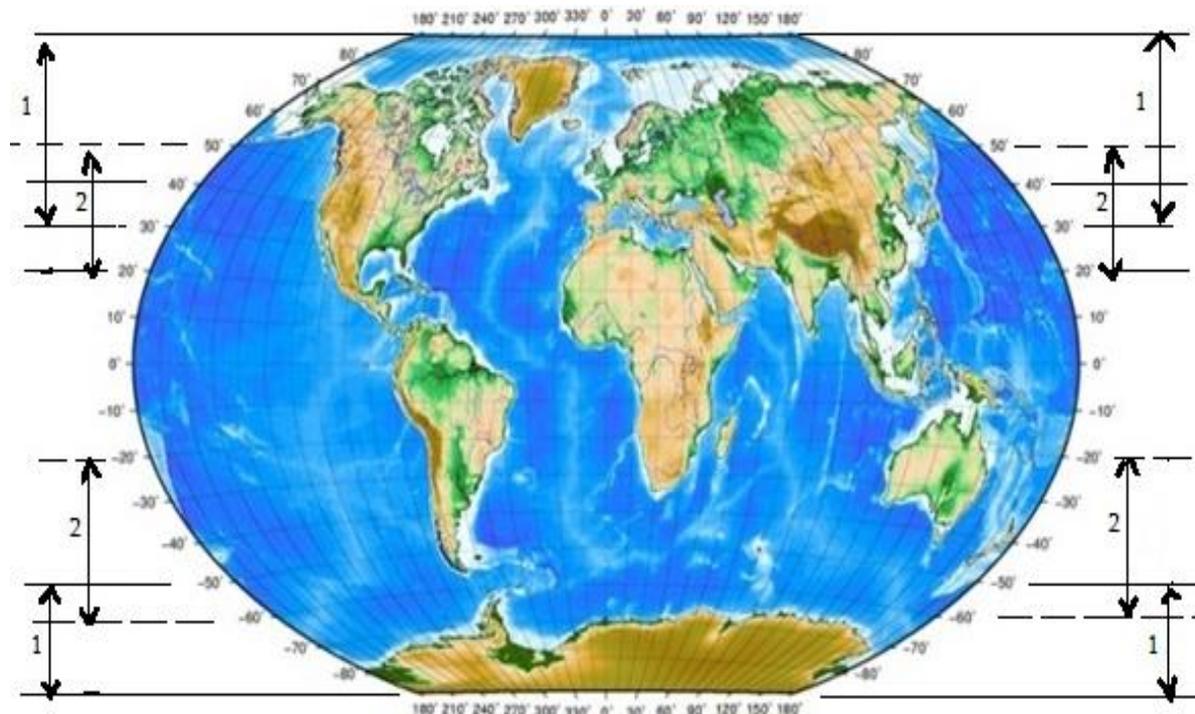


Рис. III.3.1. Карта оледенения Земли

1 – пределы распространения оледенения в среднем Плейстоцене; 2 – пределы распространения оледенения в верхнем Плейстоцене

В межледниковые периоды зональность восстанавливалась, а климат становился даже теплее современного.

За последние 10 000 лет (Голоцен), который считается послеледниковой эрой, было несколько потеплений. Относительно большое потепление климата в Европе наблюдалось 6000 лет назад, за которым последовало своеобразное похолодание.

Продолжительность каждого ледникового цикла уменьшается по мере приближения к современной эре (280 000; 45 000; 16 000; 6 000 лет). Данные об абсолютном возрасте осадочных пород использовались при изучении и уточнении ледниковых и межледниковых эпох. В течение последних 25-30 тысяч лет радиоуглеродные и калий-аргоновые радиометрические исследования используются как основа для более отдаленной эпохи. Тем не менее, объективно оценить ледниковые периоды сложно. Ряд исследователей называют разное количество оледенений, а некоторые из них считают, что антропогенное оледенение было одно, но факт существования оледенений и межледниковых эпох бесспорен.

Существующие в настоящее время природные зоны являются результатом длительной эволюции Мира, которая определяется климатическими и горообразовательными

факторами. История изучения зависимости расположения природных зон от климатических условий насчитывает более 100 лет.

Опираясь на данные теплых эпох (когда климат был намного теплее современного), можно сказать, что грядущее потепление приведет к существенным изменениям в экосистеме. Например, при потеплении на 2°C существенно изменится расположение и площади растительных зон Кавказа (рис. III.3.2).

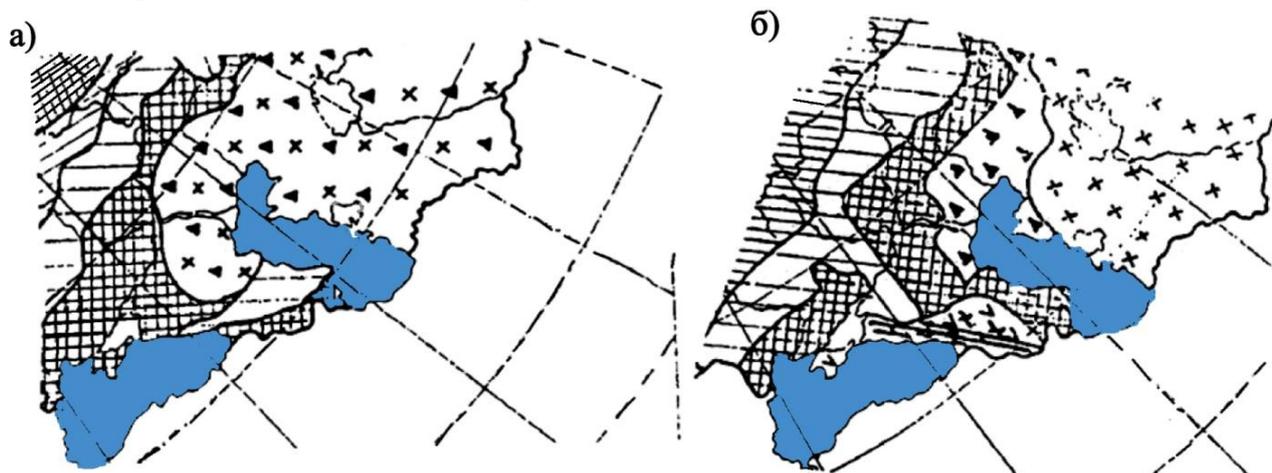


Рис. III.3.2. Расположение зон естественной растительности на Кавказе в современности (а) и при потеплении (б).

 – степь;
  – широколиственный лес;
  – полупустыня;
 ++ – пустыня;
  – хвойный лес;
  – смешанный лес

В Боржомском ущелье площадь хвойных лесов уменьшится в 3 раза, площадь лиственных лесов увеличится в 10 раз, а их ареал расширится к северу. Эти изменения неизбежны, если человек не будет вмешиваться в естественные процессы потепления.

Значительные природные изменения произойдут в верхних широтах Северного полушария Земли. На Кавказе, особенно в районе Колхиды, будут созданы благоприятные климатические условия для роста лесов. Таким образом, ожидаемые изменения климата не должны иметь катастрофических последствий для растительности Закавказья.

В период похолодания значительное количество воды было затрачено на образование ледников, после таяния которых вода возвращалась в Мировой океан, происходило эвстатическое повышение уровня моря. В ледниковый период уровень мирового океана понизился на 120 м по сравнению с современным уровнем.

На Черном море могут наблюдаться как регрессионные (понижение уровня), так и трансгрессионные (поднятие уровня) явления, а также тектонические движения земной коры. Регрессия происходит в Варненском заливе и Бургасе. Соответственно, вблизи Колхиды было замечено влияние трансгрессии, которое для Черного моря можно объяснить эффектом колебания водной "чашки". Величина этих колебаний уровня достигает нескольких десятков сантиметров. Происходившие в земной коре геологические процессы вызвали опускание и поднятие прибрежной суши Черного моря. Так, город Диоскурия, который был основан в VI веке до нашей эры и просуществовал 12 веков, затем был найден на глубине 4 м под уровнем моря. Та же участь постигла г. Фазис, а в настоящее время г. Потти постепенно "тонет".

Последнее потепление в Голоцене было 6000 лет назад, за ним последовало похолодание, продолжающееся и по сей день, но в результате антропогенного воздействия

глобального потепления на Землю уровень мирового океана повышается со скоростью 1,8 мм/год [Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., Иремашвили И.Р., 2020] (рис. III.3.3).

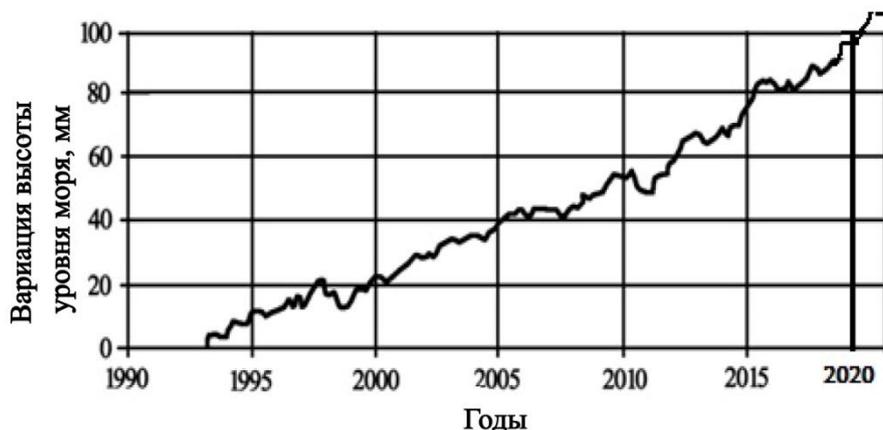


Рис. III.3.3. Повышение уровня мирового океана с 1993 г.

В результате глобального потепления объем талой ледниковой воды достигнет 920 км³/год. Тогда время, в течение которого ледниковые воды (27 млн км³) покроют поверхность мирового океана и соответствующую часть суши, составит 29 400 лет. Кроме того, уровень мирового океана поднимется на 50 м!

Причины современного глобального потепления на Земле можно разделить на две группы: **экзогенные** (внешние) и **эндогенные** (внутренние) [И. Иорданишвили, И. Иремашвили, К. Иорданишвили, Д. Поцхверия, Н. Канделаки, Л. Биланишвили, 2017 (на грузинском языке)]. К **экзогенным** (внешним) причинам относятся – активизация солнца; подъем значительных объемов ювенильных (глубинных) вод к поверхности Земли в виде гейзеров и вулканических минеральных вод; изменения орбитального движения Земли вокруг Солнца, представляющие собой процесс медленных изменений, длящийся десятки тысячелетий. Этот процесс находится в тренде современного потепления, которое могло бы принести новое оледенение, если бы не влияние антропогенной деятельности.

На территорию центральной части Америки холодные воздушные массы приходят с севера, а горячие – с Карибского моря. Горячее течение из Карибского моря – "Гольфстрим" идет на север, а столкновение холодного Лабрадорского течения с побережьями Канады и США вызывает различные аномалии, например, ураган "Ирма". Теплое течение движется в сторону Арктики, благодаря чему ледяной остров Гренландия уступает место зелени на южном берегу, даже порт Архангельск не замерзает, а порты Одессы и Симферополя в Черном море – замерзают. В это время в океане движутся холодные и горячие течения, что является одной из основных причин образования штормов. В Европу очаги пониженного давления входят в виде циклонов с Атлантического океана и движутся на восток, они насыщаются водяным паром, что вызывает осадки, проливные дожди и наводнения.

К **эндогенным** (внутренним) причинам относятся развитие техногенных технологий и переработка нефтепродуктов, уничтожение лесного покрова, пренебрежение агротехническими мероприятиями при использовании сельскохозяйственных угодий, строительство дорог и трубопроводов и др.; эксплуатация тепловых и атомных электростанций; образование углекислого газа, метана и других промышленных ядовитых газов, в результате чего увеличивается количество выбрасываемой в атмосферу тепловой энергии,

водяного пара и углекислого газа (CO_2). Показатели "теплого воздействия" на Землю таковы: от CO_2 – 65%, от CH_4 – 20%, от галогенных газов – 10%, от N_2O – 4,5%. В конце XXI века количество CO_2 в атмосфере увеличится вдвое.

По данным ООН, убытки, причиняемые частыми природными явлениями различным отраслям экономики в Мире, ежегодно составляют несколько сотен миллиардов долларов. Человеческие жертвы превышают 250 000. Со второй половины XXI века средняя температура на Земле увеличилась на $0,6^\circ\text{C}$ (рис. III.3.4). Если этот процесс будет развиваться такими темпами, то температура на Земле повысится на 4°C в середине XXI века [МГЭИ, 2013].

Основным компонентом углекислого газа являются водяные пары, концентрация которых в атмосфере увеличивается с повышением температуры воздуха [Соловьев Л.П., 2014].

Катастрофическое увеличение и частота климатических явлений изменили количество осадков и урожайность сельскохозяйственных культур; уменьшилось количество воды в ледниках; некоторые виды живых организмов вымерли; увеличилось количество заболеваний и т.д. Например, летом 2017 года из-за глобального потепления откололась большая масса антарктического льда, вес отколовшегося льда составил 10^{12} тонн, а длина — 175 км.

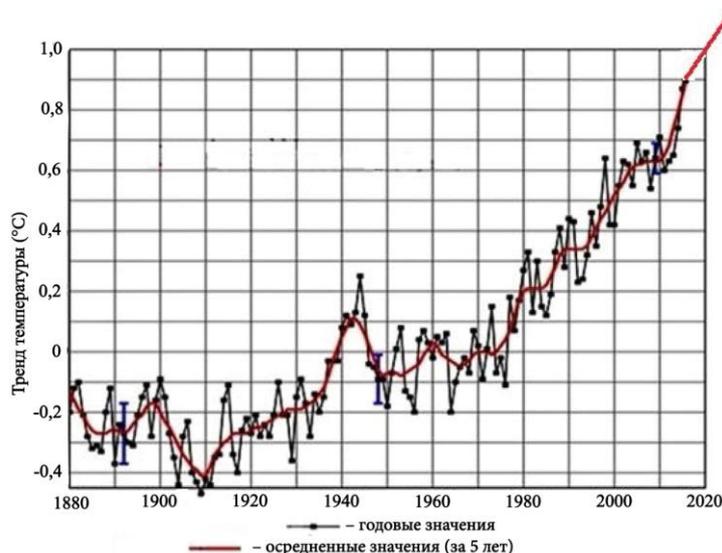


Рис. III.3.4. Тенденция отклонения средней температуры воздуха на Земле от средней температуры в период 1880–2020 гг.

Наиболее **интенсивно ледники** тают в тропических и субтропических странах. В Альпах, Боливии, Восточной Африке, Танзании, на горе Килиманджаро, являющейся высочайшей вершиной Африки, полностью исчез ледяной покров.

Несмотря на то, что аномальные метеорологические явления, приходящие с севера, смягчаются Кавказским хребтом, последствия глобального потепления можно наблюдать и на территории Грузии:

- на всей территории наблюдается тенденция повышения температуры воздуха (рис. III.3.5) [Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., Иремашвили И.Р., 2020];
- наблюдаются таяние ледников и подъем уровня Черного моря, частые штормы, наводнения и паводки, оползнево-гравитационные и селевые явления, сильный ветер, осадки, град, сход лавин, биологические угрозы, пожары и т.д.

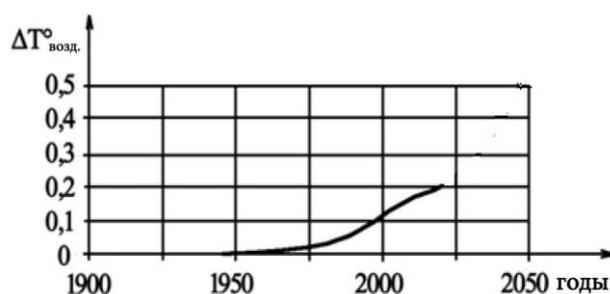


Рис. III.3.5. Современный осредненный тренд температуры на территории Грузии

Черноморские штормы и уровень режим. На поверхности Черного моря протяженностью 1200 км ветры имеют значительный разбег, вызывая образование высоких крутых волн. Воздушные массы, поступающие с моря, содержат большое количество водяного пара, что вызывает обильные осадки в Западной Грузии.

Из-за глобального потепления и антропогенного воздействия (строительство гидроэлектростанций в бассейне Черного моря, увеличенная добыча строительных материалов общим объемом до 40 млн м³, неэффективность берегоукрепления и др.) прибрежная часть Колхиды размывается (Рис. III.3.6) [Summary, 1996]. Так, осенью 2017 года участок Батумского бульвара шириной 4 м был отрезан, от бульвара шириной 7 м осталось только 3 м, а здания на набережной разрушены.

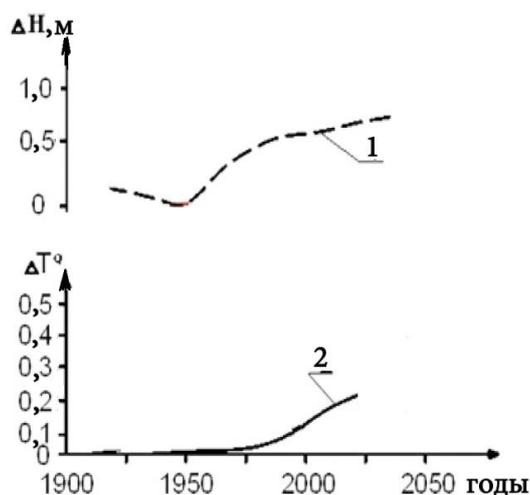


Рис. III.3.6. Осредненный тренд уровня Черного моря в прибрежной зоне Колхиды (ΔH) (1) и температуры воздуха (ΔT) (2)

Вынос наносов из р. Ингури и р. Чорохи уменьшился в 3 раза, а во время штормов море вновь наступает на берег (табл. III.3.2).

Таяние ледников. Согласно исследованиям грузинских гляциологов в Грузии во второй половине XIX века в Кодорском ущелье насчитывалось 145 ледников, а в 2014 году – 118; в бассейне р. Ингури было – 299, а в 2014 г. – 269; в бассейне р. Терек в 1960 г. было 99 ледников, а в 2014 г. осталось 58. Некоторые ледники, помимо уменьшения в размерах, даже раскалывались при таянии. Например, Ушба в 1960 году был одним из сложных долинных ледником, в 2012-2013 годах он уже раскололся на две части.

Таблица III.3.2

**Объем наносов, приносимых реками
к побережью Черного моря Колхиды**

№	Название реки	Объем наносов м ³ /год	
		1980-ые годы	2010-2018 гг.
1	Ингури	370 000	29 000
2	Риони	2 066 000	1 350 000
3	Чорохи	5 330 000	1 060 000
Всего		7 766 000	2 439000

Половодья и паводки характерны почти для всех рек Грузии. Особенным риском выделяются реки Имерети, Самегрело, Гурии, Мцхета-Мтианети, реки Кура и Алазани. До 1995 г. интенсивные паводки повторялись каждые 5-6 лет, а в 1995-2023 гг. эти явления участились почти вдвое (каждые 2-3 года). 13 июня 2015 г. наводнение, произошедшее в бассейне реки Вере, является наглядным примером опасности этого стихийного бедствия и его последствий, когда был зафиксирован расход воды в реке до 500 м³/с.

Показатели паводков на реках Грузии в связи с глобальным потеплением приведены в таблице III.3.3 [Г. Григолия, Д. Кереселидзе, В. Трапаидзе, Г. Брегвадзе, 2013, 2014 (на грузинском языке)]. Максимальные расходы паводков на реках Западной Грузии увеличились, в то время как максимальные расходы паводков на реках Восточной Грузии имеют небольшой, но положительный тренд. Такая ситуация обусловлена быстрым расходом воды, аккумулированной в водохранилищах Восточной Грузии, в связи с увеличением потребности в оросительной воде в жаркий период года.

Таблица III.3.3

Показатели паводков на реках Грузии

№	Река	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдения годы	Максимальный расход, м ³ /с	Год
1	2	3	4	5	6
1.	Ингури, (с. Джвари)	3170,0	1928-1965	1000,0	1941
2.	—	—	1966-1970	1540,0	1970
3	Хоби (с. Легархе)	310,0	1937-1965	418,0	1962
4	—	—	1966-1982	850,0	1982
5.	Риони (с. Сакочахидзе)	13300,0	1928-1965	3000,0	1963
6.	—	-//-	1966-1977	3520,0	1977
7.	Квирила (г. Зестафони)	2490,0	1930-1965	883,0	1933
8.	—	—	1966-1982	1030,0	1982
9.	Чорохи (с. Эрге)	22000,0	1930-1968	3840,0	1942
10.	—	—	2002-2012	500,0	2012
11.	Кура (с. Ликани)	21000,0	1968-1977	800,0	1977
12.	—	—	1978-1986	1500,0	1984
13.	Вере (г. Тбилиси)	152,7	1963-1992	140,0	1963
14.	—	—	1993-2015	468,0	2015

На территории Турции на р. Чорохи уже построено 10 водохранилищ, что значительно снизит риски наводнений и оползней (рис. III.3.7).



Рис. III.3.7. Каскад водохранилищ Турции на р. Чорохи

В этих водохранилищах собирается пляжообразующий материал, который раньше поступал на Батумское побережье. Поэтому Батумское побережье должно заполняться искусственно насыпным материалом.

В последние годы объем воды, поступающей в ряд водохранилищ, меньше, чем в предыдущие годы (рис. III.3.8; III.3.9.а; III.3.9.б; III.39.в), а объем приносимых наносов увеличился. Например, сезонный сток сезонного зарегулирования Жинвальского водохранилища почти полностью расходуется из-за хронических перебоев с электроэнергией. Фаза его наполнения длится с 20 марта по 20 июля, а фаза опорожнения – с июля.

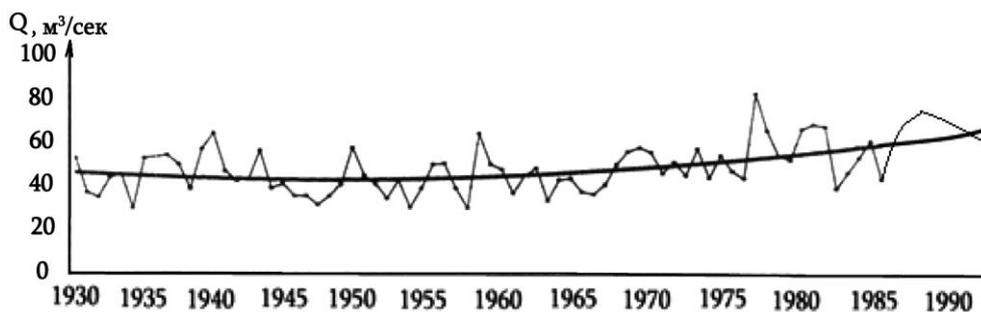


Рис. III.3.8. График колебаний среднегодовых расходов воды р. Арагви в истоке Жинвальского водохранилища

Из-за глобального потепления климата и естественного циклического увеличения стока р. Арагви приходная часть водного баланса Жинвальского водохранилища увеличилась на 30% в 1990-1998 гг. по сравнению со средним значением 1950-1960 гг. В паводковый период этот прирост выше на 33 %, в маловодный период прирост незначителен, в октябре, наоборот, сток снижается. В проекте Жинвальского водохранилища для полного заиления мертвого объема предусматривалось 120-140 лет, а для полного заиления водохранилища – 400-500 лет. К 2017 году на дне Жинвальского водохранилища накопилось 121,54 млн м³ наносов. До 2010 г. процесс заиления идет менее интенсивно (2,6÷2,9 млн м³/год), а после 2010 г. – в связи с частыми, обильными паводками и увеличением объема воды в

водохранилище – увеличивается интенсивность накопления наносов – $W_{\text{нан}}/t = 8,08$ млн м³/год. При сохранении такой динамики к 2025 году объем твердых наносов в Жинвальском водохранилище сравняется с мертвым объемом водохранилища ($W_{\text{нан}} = V_{\text{мерт}} \approx 150,0$ млн м³).

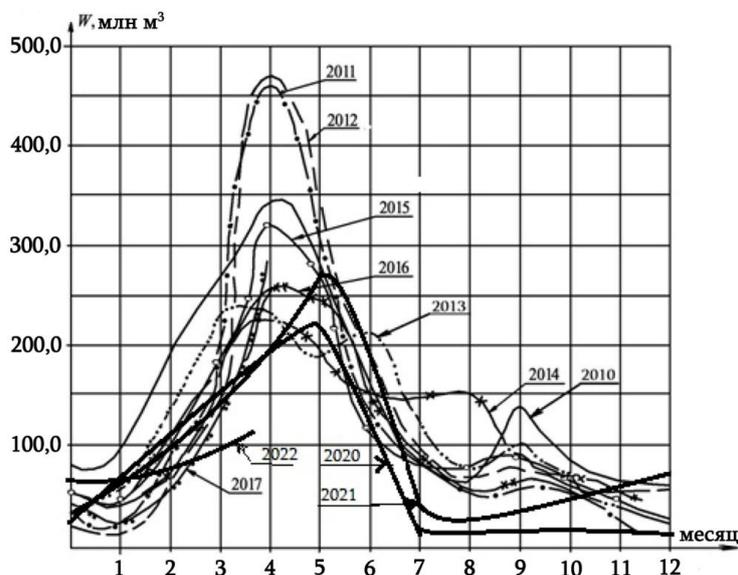


Рис. III.3.9.а. График объема воды, поступающей в Жинвальское водохранилище

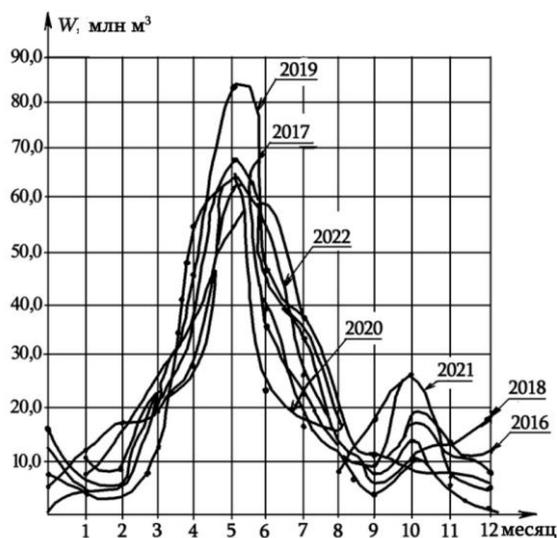


Рис. III.3.9.б. График объема воды, поступающей в Сионское водохранилище

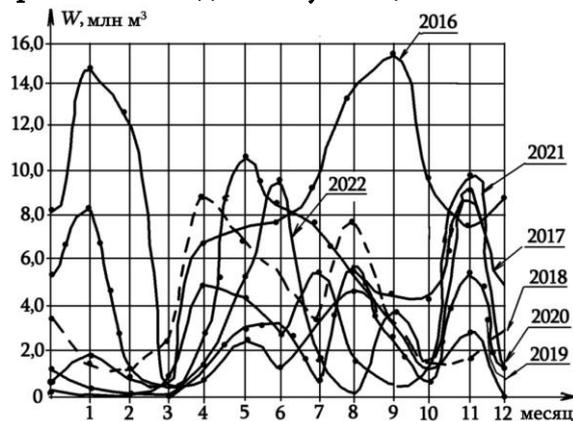


Рис. III.3.9.в. График объема воды, поступающей в Тбилисское водохранилище

Примечание: с 25 сентября 2019 года «Малое» море Тбилисского водохранилища было опорожнено в связи с работами по очистке водозабора

Такая же ситуация и в Сионском водохранилище: к 2020 году на дне Сионского водохранилища накопилось 4,30 млн м³ наносов.

Селевые явления происходят во всех климатических зонах Грузии – от побережья до высокогорных. Активизация селевых явлений обусловлена интенсивными атмосферными осадками, паводками, таянием снега и льда, прорывом дамб, сходом ледников и оползнями, вырубкой леса, добычей инертных материалов, чрезмерным выпасом скота, бессистемной урбанизацией (застройка в зонах повышенной опасности) и др.

В Грузии 532 реки, способные переносить селевые потоки (табл. III.3.4) [Р. Диаконидзе, 2005; И. Круашвили, Э. Кухалашвили, И. Инашвили, К. Бзиава, 2017 (на грузинском языке)].

Таблица III.3.4

Селеопасные районы Грузии

№	Название района рек	Количество селеопасных бассейнов
1	2	3
1	Кодори-Бзипи	109
2	Ингури-Хоби	56
3	Риони	122
4	Квирила-Дзирула	29
5	(Чорохи-Супса) Аджария-Гурия	40
6	Терек-Аргуни	99
7	Лиахви и Арагви	106
8	(Иори) Цив-Гомбори	44
9	Алазани	80
10	(Кура– Боржоми) Джавахети и Месхети	160
11	(Кура – Тбилиси) Шида Картли	53
12	(Алгети-Храми) Локи	29
Всего		927

Наводнения угрожают населенным пунктам в долинах рек. Города повышенной опасности: Тбилиси, Кварели, Телави, Сагареджо, Гурджаани Лагодехи, Они, Боржоми, Местия, Лентехи, Адигени, Мцхета, Цагери и другие.

В результате исследований установлено, что в Грузии наиболее распространены паводки дождевого генезиса. По данным Национального агентства по окружающей среде в 1995-2012 годах ущерб, причиненный только наводнениями, составил 358 миллионов лари, погибло 35 человек. Грузия – уникальная страна, на территории которой наблюдаются все климатические зоны – от жаркого до холодного. Населенные пункты Кахетии, расположенных у подножия Кавказского хребта, находятся под постоянной угрозой наводнений, и в первую очередь – Кварели, а также поселки Рача и Земо Сванети. За последние 100 лет в результате оползней в долине р. Дуруджи погибло более 150 человек, большой ущерб был нанесен населению г. Кварели. Г. Тбилиси также находится в зоне повышенного риска

наводнений. В результате сильных дождей в мае 2012 г. и трансформировавшегося оползня в Тбилиси погибли 5 человек, были разрушены дома. Ущерб превысил 20 миллионов долларов. 13 июня 2015 г. в долине реки Вере с непрекращающимся в течение 4-5 часов сильных дождей, река быстро вздулась и в русле образовался селевой поток. В начале августа 2023 г. в долине Чанчахи в результате таяния ледника и дождей образовался селевой поток, высота которого у курорта Шови достигла 5,0 м погибло 32 человек. Следует также отметить, что в последние годы на фоне глобального потепления в Грузии участились сильные ветры, град, лавины, бури, лесные пожары и т.д. [Г. Гавардашвили, 2017 (на грузинском языке)].

Повторяемость **сильных ветров** в Грузии удвоилась за последние 20 лет. Сильные ветры со скоростью 25-30 м/с повторяются 5-7 раз в году, ветры со скоростью более 30 м/с на участке Кутаиси-Зестафони и в окрестностях Тбилиси – 1-2 раза в год, а в других регионах страны, в среднем пять раз. Сильный ветер повреждает коммуникации и линии электропередач. Он вызывает сильное морское волнение, пыльные бури, метели и неравномерное распределение снега, что сопровождается образованием мороза, обеднением почвы влагой, активизацией абразионных явлений берегов водоемов и моря.

Град нередок на всей территории Грузии. Интенсивность и частота града особенно высоки в Восточной Грузии. Ежемесячно регистрируется от 5 до 15 случаев. Град может полностью уничтожить посевы, урожай, домашний скот и птицу. При массе отдельных градин более 100-200 грамм возможна гибель людей. За последние 13 лет ущерб, нанесенный стране градом, превысил 140 миллионов лари.

Лавины также нередки в стране. Снежные лавины вызываются сильно пересеченным и наклонным рельефом, интенсивным снегопадом, быстрым таянием снежного покрова, метелями, резкими перепадами температур и дождями. Частота и интенсивность этих стихийных бедствий увеличились с 1970 года. Массовые лавины наблюдались в 1970-1971, 1975-1976, 1986-1987, 1991-1992, 1996-1997, 2004-2005 гг.

Снежные лавины наносят большой ущерб хозяйственной деятельности людей, населенным пунктам, приводят к человеческим жертвам, разрушениям, покрытию дорог и остановке транспорта, выбивают из строя опоры линий электропередач.

При неблагоприятных климатических условиях (засуха, теплая зима и жаркое лето) возрастают **ветеринарные и фитосанитарные** угрозы. В Грузии зарегистрировано около 2500 видов грибов и 1500 видов вредных насекомых, вызывающих различные заболевания. Сельскохозяйственная база Грузии пострадала от массового распространения саранчи, в результате которого было повреждено до 200 тыс га сельскохозяйственных угодий (эпицентр распространения – Восточная Грузия).

Массовый ущерб сельскохозяйственным культурам могут наносить и другие вредные организмы (грибки, вирусы, бактерии, грызуны и др.). В Грузии увеличились болезни животных (бешенство, классическая и африканская чума свиней, сибирская язва, бруцеллез) и птиц (ньюкаслская птичья болезнь, синий язык, оспа, высокопатогенный птичий грипп и др.).

Продолжительная засуха и высокие температуры увеличивают риск возникновения **лесных пожаров**. Среди природных факторов, вызывающих пожары, наибольшее значение имеют молнии. В 2017 году самые крупные пожары в Грузии вспыхнули в близлежащих к Тбилиси районах – Боржоми и Душети. Сгорело более 100 гектаров уникальной лесной площади, сократилось снабжение кислородом, не говоря уже о деградации почвы, на восстановление которой уйдет несколько десятилетий. Если учесть, что 1 га леса поглощает 10,0 т углекислого газа и выделяет 20,0 т кислорода в год, то из-за пожара 2017 года регион потерял 2000 т кислорода и добавил 1000 т углекислого газа. При пожаре выделялось большое количество тепловой энергии, из-за чего создавались невыносимые условия для проживающего поблизости населения.

Химический состав поверхностных вод Грузии также зависит от глобального потепления. Количество главных ионов в речных водах зависит от природных и антропогенных факторов (рис. III.3.10; III.3.11).

Таким образом, обсуждаемые вопросы о последствиях глобального потепления представляют собой особо опасную проблему и требуют своевременного анализа и оценки.

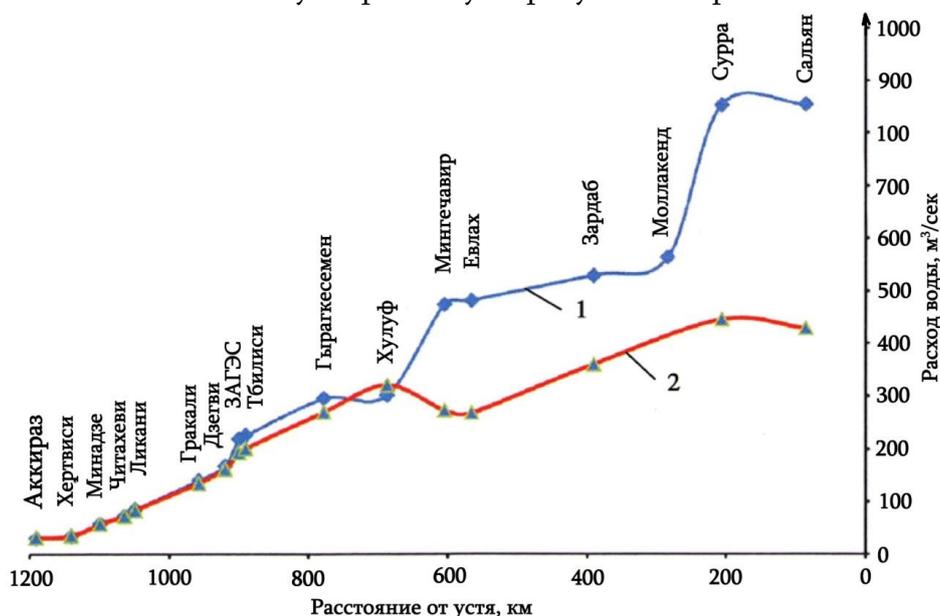


Рис. III.3.10. Естественная и антропогенная трансформация годового стока реки Кура по ее длине (1991-2012 гг.).

1 – условный естественный сток; 2 – наблюдаемый сток

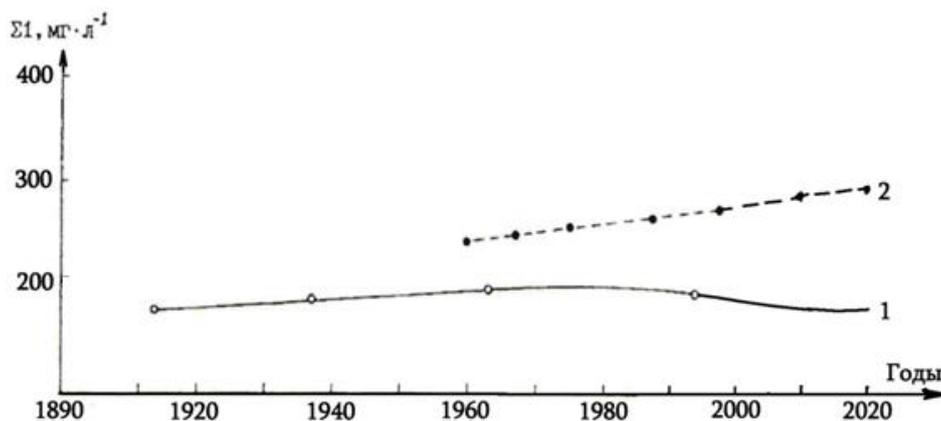


Рис. III.3.11. Основные изменения ионов в реке Арагви (1) и Кура (2)

III.4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Для строительства водохранилищ в горных районах Грузии необходимо проанализировать следующие данные и учесть специфику прогнозируемых факторов: выбор места расположения горных водохранилищ; особенности водного баланса горных водохранилищ; определение площади поверхности и объема горных водохранилищ; риск геоэкологических факторов горных водохранилищ.

Специфика проектирования и эксплуатации горных водохранилищ

По данным Организации Объединенных Наций (ООН) на территории Земли наблюдается более 50 природных и техногенно опасных процессов, ежегодно умирает более 150 000 человек, а экономический ущерб составляет более 100 миллиардов долларов. На современном этапе антропогенное воздействие соответствует естественным процессам, развивающимся в литосфере, гидросфере и атмосфере. Эти тенденции резко усиливаются в горных районах, отличающихся значительными изменениями природноландшафтных компонентов, неустойчивостью природных экосистем, повышенными рисками формирования опасных природно-техногенных процессов. Использование водных ресурсов в природных условиях Закавказья осложняется неравномерностью распределения водного стока по ее территории.

Место строительства горного водохранилища выбирается с учетом следующих условий: от развития природно-техногенных, геологических и других опасных процессов в районах территории; – от экзогенных (вызванных внешними причинами) – при анализе негативных процессов в верхних слоях земной коры, таких как: сейсмическая активность; современные движения земной коры; наносы; режим верхней и нижней гидросферы.

Специфика водного баланса горных водохранилищ

Регулирование водного режима стока водохранилищ в горных районах носит, в основном, сезонный характер, значение отношения полезного объема водохранилища ($V_{пол}$) к годовому стоку речной воды ($W_{сток}$) значительное – $V_{пол} : W_{сток} \geq 0,3$. Водный баланс горных водохранилищ характеризуется значительной изменчивостью, что определяется особенностями регулирования речного стока в годовом и сезонном плане.

Уравнение водного баланса горного водохранилищ в момент времени (t) имеет вид:

$$V_k - V_{k-1} = -Q_1 \sum_{k-1}^k t + Q_2 \sum_{k-1}^k t + V_{бок} + V_{осад} - V_{исп} \pm V_{подз} \pm V_{несоотв}, \quad (III.4.1)$$

где V_k – объем воды в конце отчетного периода; V_{k-1} – объем воды в начале отчетного периода; Q_1 и Q_2 – средние расхода воды в верхнем и нижнем створе водохранилища; $\sum_{k-1}^k t$ – периоды времени (в секундах); $V_{бок}$ – объем воды из боковых притоков (по периметру участка); $V_{осад}$ – количество осадков на поверхности водохранилища; $V_{исп}$ – объем воды, испарившейся с поверхности водохранилища; $V_{подз}$ – объем подземного стока или фильтрационные потери; $V_{несоотв}$ – несоответствие баланса.

Величины атмосферных осадков и испарения на поверхности горного водохранилища практически не меняют показатели водного баланса, что связано с малой площадью

поверхности и значительной глубиной водохранилища.

Специфика гидрологических характеристик горных водохранилищ

Гидрологические данные по эксплуатации горных водохранилищ включают: орографию; климат; водный режим. Материал, необходимый для **гидрологической характеристики** горного водохранилища: гидрологические данные; кривые стока и расходов воды на проектных участках, их колебания и внутригодовое распределение; максимальные расходы в весенний период; максимальные расходы паводков; расчетные гидрографы; максимальные значения водного и твердого стока; гидрохимия водохранилищных вод и фильтратов.

Данные гидрометеослужбы в виде графиков и таблиц за период эксплуатации горного водохранилища: графики и схемы бассейна реки, гидрографической сети и населенных пунктов, гидрологических метеостанций, строящихся и эксплуатируемых плотин гидроузлов, распределения стока воды и т.д.; график изменения площади водосбора; продольный профиль реки; графики средних и максимальных значений метеорологических элементов (температура, влажность, радиация и др.); схемы розы ветров; гидрологические кривые реки: $Q=f(H)$, $W=f(H)$, $V_{cp}=f(H)$; график изменения коэффициента шероховатости русла реки; характерные гидрографы, объединенные по годам на всем протяжении реки; графики корреляционных зависимостей среднегодового и максимального расходов реки в аналоговых пунктах; хронологические графики среднегодовых расходов воды (не менее чем за последние 20 лет); кривые обеспеченности максимальных и минимальных среднегодовых расходов воды; кривые расходов воды в верхнем и нижнем бьефах водохранилища; схема размещения гидрометеорологической сети в районе водохранилища.

Список необходимых таблиц: таблицы гидрометеорологических данных; средне-месячные, годовые, минимальные и максимальные данные расходов воды на расчетных участках (за период наблюдений); таблицы трансформированного стока воды; таблицы гидрографов паводков в верхней части бьефа плотины и бокового стока; таблицы данных о режимах замерзания рек; таблицы значений твердого речного стока (среднегодовые и месячные); таблица гидрометеорологической сети района водохранилища.

Особенности определения объема и площади зеркала горных водохранилищ

Площадь зеркала водохранилища и объем воды определяются по заданным отметкам зеркала водохранилищ. Показателями поверхности зеркала водохранилища являются: уровень катастрофического затопления (УКЗ) – уровень, который можно допустить на короткий промежуток времени в случае катастрофических расходов (наводнения и ливневые дожди); нормальный уровень затопления (НПУ) – уровень, при котором рассчитывается нормальная работа напорных сооружений; уровень мертвого объема (УМО) – самый низкий уровень водохранилища; полезный объем ($V_{пол}$) – объем воды между (НПУ) и (УМО) водохранилища; мертвый объем ($V_{мерт}$) – объем воды ниже уровня мертвого объема водохранилищ; полный объем ($V_{полн}$) – сумма полезного и мертвого объемов водохранилищ.

Риск геоэкологических факторов горных водохранилищ

Природные процессы, развивающиеся на современном этапе в литосфере, гидросфере и атмосфере, соизмеримы с антропогенной деятельностью. Эти тенденции усиливаются в горных районах.

При эксплуатации горных водохранилищ развиваются геологические и склоновые процессы; в районах, окружающих водохранилище – сейсмические явления; возникновение новых подземных водонасыщенных горизонтов, вызванное затоплением и подтоплением окружающей территории и др.

На основании систематизации и обобщения результатов исследований установлено, что воздействие основных факторов на развитие склоновых процессов на разных типах водохранилищ существенно различается (табл. III.4.1).

Таблица III.4.1

Ранжирование факторов, влияющих на склоновые процессы

Качество ранжирования	Ранжирование факторов по типу водохранилищ				Обозначения	Единица измерения
	Равнинные водхр-ща	Предгорные водхр-ща	Горные водхр-ща	Высокогорные водхр-ща		
1	Э	Э	А	V_{cp}	Э - Энергия волны	тм
2	В	А	V_{cp}	А	А – Амплитуда сработки воды	м
3	m	m	А	І	В – Ширина мелководья	м
4	$K_{раз}$	$K_{раз}$	m	m	$m = ctg\alpha$ – Угол склона	–
5	$H_{бер}$	В	І	Е	$K_{раз}$ – Коэффициент размыва породы	м ³ /т
6	А	$H_{бер}$	$K_{раз}$	$K_{раз}$	І - Градиент грунтовых вод	–
7	V_{cp}	V_{cp}	$H_{бер}$	$H_{бер}$	$H_{бер}$ – Высота берега	м
8	І	І	В	В	V_{cp} – Скорость движения кромки воды при сработке уровня	м/сутки

Таким образом, значение коэффициента амплитуды сработки уровня воды (А) горных водохранилищ значительно выше, чем аналогичный показатель для равнинных водохранилищ.

Последствия, которые развиваются при понижении уровня воды горных водохранилищ:

- уменьшаются площади орошаемых земель, орошаемых самотеком;
- снижается выработка электроэнергии гидроэлектростанциями;
- выходят из строя существующие рекреационные объекты (пляжи, гавани), системы водоснабжения и водоотведения;
- увеличивается загрязнение рек, так как нарушаются условия очистки и разбавления

сточных вод;

- загрязняются земли, лишенные воды, вследствие осадконакопления биогенными элементами в илистых отложениях;
- деградируют водные биоценозы и ихтиофауна.

Проблемы, возникающие при подъеме уровня воды водохранилищ в непредвиденных условиях эксплуатации:

- изменяются условия водоснабжения растений в связи с подъемом уровня грунтовых вод;
- развиваются деформации в сухих трещинах противодиффузионных элементов (керна, экран, понур) береговых откосов и земляных дамб;
- нарушена структура наземных массивов за счет развития эрозионных трещин;
- изменяется облесение поверхности естественных и искусственных оврагов и т.д.

Развитие негативных процессов при понижении или подъеме уровня воды находится в тесной зависимости от скорости движения уровня воды ($V_{дв}$), высоты сработки призмы ($H_{сп}$) и характеристик пород.

На основе анализа факторов риска, обусловленных строительством водохранилищ в горных районах, определен **основной** фактор, способствующий развитию негативных процессов, которым является непредвиденный режим подъема (понижения) уровня воды водохранилища.

Об оценке риска от природного ущерба впервые было указано в 1997 г. на Международной конференции, в которой приняли участие ученые из Грузии, Соединенных Штатов Америки, Украины, Российской Федерации и Азербайджана (табл. III.4.2) [Международная конференция..., 1997].

Таблица III.4.2

Основные группы рисков

№	Показатели классификации	Основные группы рисков	
1	2	3	
1	Генезис риска	Естественный	Техногенный
2	Область развития	Литосфера, гидросфера, атмосфера, биосфера,	Инженерно-геологические, инженерно-гидрологические, инженерно-метеорологические, экологические, комплексные
3	Степень распространения	Местный, районный, областной, региональный, государственный, глобальный	
4	Характеристика воздействия	Краткосрочные (разовые, многолетние), постоянные (постоянно действующие)	
5	Форма воздействия	Прямые, не прямые, комбинированные, вторичные	
6	Среда воздействия	Экономический, социальный, экологический, комбинированный	
7	Масштаб воздействия	Слабый, средний, значительный, катастрофический	

1	2	3	
8	Показатели оценки	Площадь разрушения, га/год, км ² /год; уничтожение сельскохозяйственных объектов, лари/год; пострадавшее население, чел/год, чел/км ² ; уничтожение биосферы, индивиды/км ² площади лесов, га.	
9	Виды рисков при эксплуатации систем водохранилищ	Сейсмические, оползневые, абразионные, эрозионные и др.	Снижение сейсмичности, переработка берегов водохранилища
		Гидрологический	Изменения речного стока
		Экологический	Затопление земель
		Биологический	Изменения свойств горных пород

Оценка риска повреждения участков $R(H)$ может быть записана в виде общего уравнения:

$$R(H) = R_X(H)X, \quad (\text{III.4.2})$$

где X – показатель плотности возможных потерь. Например, основными рисками при процессе размыва берегов водохранилища являются: экономический, социальный и экологический.

Экономический риск $R_э(H)$:

$$R_э(H) = R_t(H)d_{тер}, \quad (\text{III.4.3})$$

где $d_{тер}$ – возможные материальные потери территорий сельскохозяйственных и строительных объектов (лари/га, лари/км²) и т.д.

Социальный риск – $R_c(H)$ (ущерб населению):

$$R_c(H) = R_t(H)d_H, \quad (\text{III.4.4})$$

где d_H – плотность населения (человек/км²).

Экологический риск – $R_эк(H)$:

$$R_эк(H) = R_t(H)d_{ж}, \quad (\text{III.4.5})$$

где $d_{ж}$ – величина ущерба животным или растениям (количество/км²).

Эксплуатация водохранилищ в горных районах определяет интенсификацию **физико-геологических** процессов. Эти процессы обусловлены водонасыщением горных пород (карст, оползни, суффозия), действием волн и течений (абразия, проседание, размыв склонов) и гидрологическим циклом водохранилищ (смещение уровня воды).

Геологический риск горных водохранилищ, вызывающий резкие изменения состава горных пород, является важнейшим фактором формирования опасностей. Геологический риск определяет экономические, социальные и экологические риски. Строительство водохранилищ и их возможное воздействие на окружающую среду должны оцениваться на государственном уровне, чтобы избежать опасных рисков за счет предотвращения, а не устранения их последствий. Профилактика осуществляется путем постоянного прогнозирования возможных природно-геологических рисков, оценки рисков и защитных мероприятий.

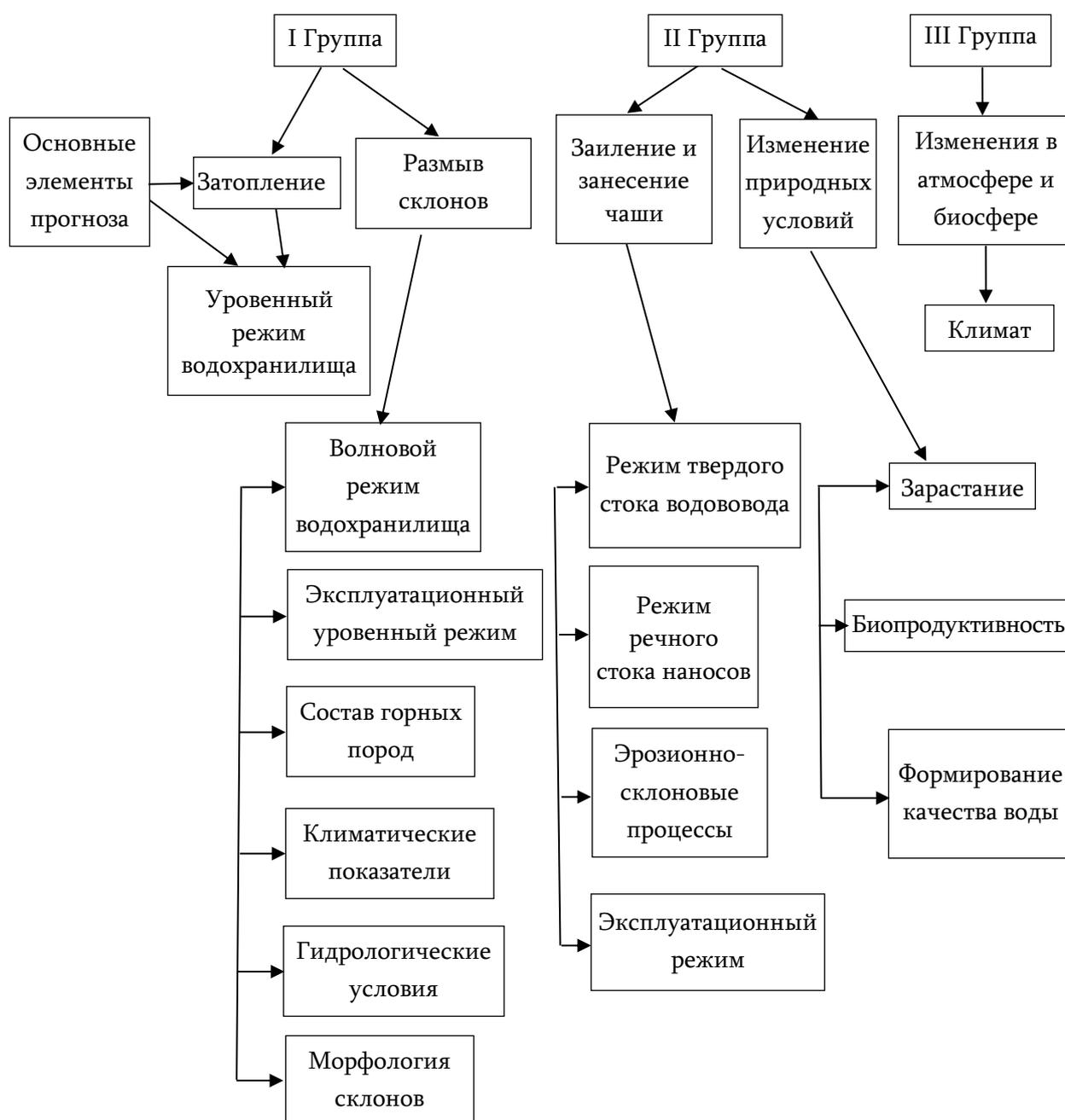
IV. СПЕЦИФИКА И ПРОГНОЗ ОБЩИХ ПОЛОЖЕНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

IV.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ «ВОДОХРАНИЛИЩЕ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

Развитие системы «водохранилище – окружающая среда» происходит в двух зонах – верхнем и нижнем бьефах водохранилища (табл. IV.I.1; IV.I.2).

Таблица IV.1.1

Общая схема развития системы «водохранилище - окружающая среда» в верхнем бьефе

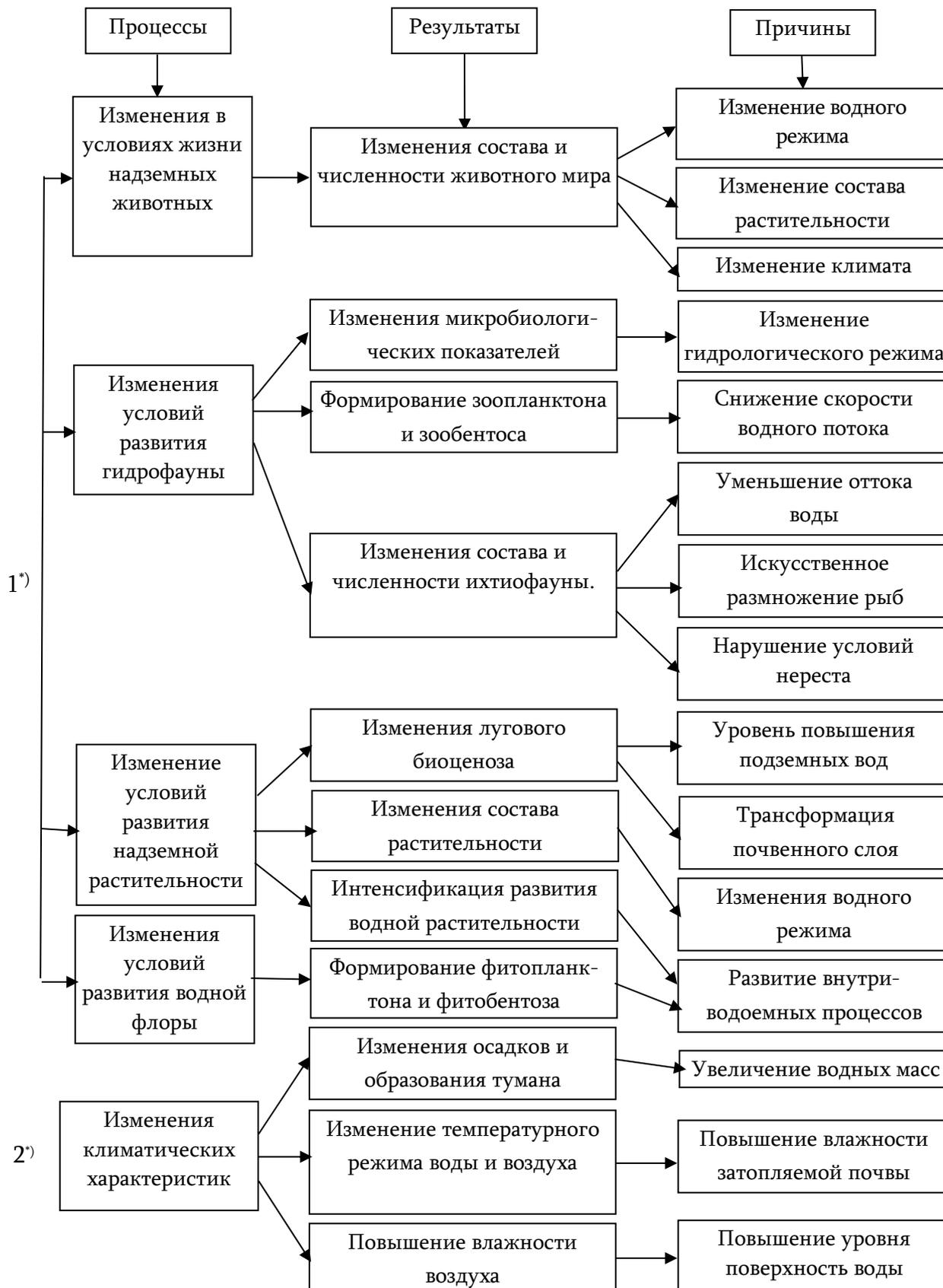


Общая схема развития системы «водохранилище – окружающая среда» в нижнем бьефе

Тип воздействия	Последствия воздействия	
	Положительный	Отрицательный
1	2	3
1. Промывы русла в нижнем бьефе плотины и понижение уровня	Исчезновение второстепенных притоков реки, уменьшение деградации русла	Ухудшение условий работы водозаборов из-за понижения уровня воды. Размыв опор мостов, устроенных на реке. Необходимость строительства низконапорных дамб. Ухудшение условий стыковки бьефов после водовыпускных сооружений
2. Нарушение баланса между высокими эродированными берегами и новыми аллювиальными землями в долине реки		Процесс размыва берегов продолжается и усиливается, а процесс восстановления - замедляется. Количество осадков уменьшается и освоенные земли в долине наводнений уменьшаются
3. Сокращение пиковых паводков и увеличение расходов воды при маловодье	Защита долины от затопления во время паводков	Заращение долины и уменьшение ее водопроницаемости. Занесение русла реки с боковых притоков
4. Воздействие на сельскохозяйственные угодия и экологию	Изменение диапазона температуры уменьшается, а минимальная температура – увеличивается	Количество приносимого ила уменьшается, за счет чего снижается плодородие почвы

Взаимодействие «водохранилище – окружающая среда» определяется изменениями, происходящими в атмосфере, биосфере, литосфере и гидросфере (табл. IV.1.3 - IV.1.6).

Общая схема формирования системы «водохранилище – окружающая среда»
в атмосфере и биосфере



Примечания: 1). Общие изменения в биосфере; 2). Общие изменения в атмосфере

Общая схема взаимодействия системы «водохранилище – окружающая среда»



Общая схема формирования системы «водохранилище – окружающая среда»



IV.2. СПЕЦИФИКА И ПРОГНОЗ ВЗАИМОСВЯЗИ «ГОРНОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

IV.2.1. СПЕЦИФИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ГОРНОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

Целесообразность строительства водохранилищ в горных районах определяется эффективным использованием стока речных вод. Задержание стоковой воды в глубоких водохранилищах с малой поверхностью обуславливает незначительные потери воды на испарение - 1-3%, что может не учитываться в водохозяйственном балансе.

Негативное воздействие гидрологического режима водохранилищ, созданных в горных районах, на окружающую среду значительно слабее (табл. IV.2.1).

Таблица IV.2.1

Влияние изменений на окружающую среду, вызванных гидрологическим режимом горных водохранилищ

Изменения гидрологического режима	Последствия воздействия на окружающую среду		Зона влияния
	Прямое	Косвенное	
Поднятие уровня воды в водохранилище	Наводнение и затопление	Изменение условий развития флоры и фауны	Между отметками НПУ и 1,5 м
Уменьшение скорости потока	Замедление водообмена	Ухудшение качества воды	На дне водоема
	Заиление и занесение	Снижение регулирующей способности водохранилища	-„-
Увеличение объема водной массы	Увеличение скорости фильтрации		-„-
	Изменения теплового режима и ледяного покрова	Изменение микроклимата	В радиусе 3 км вокруг водохранилища
	Увеличение нагрузки на дно водохранилища	Возможное развитие сейсмичности	В геологической зоне
Изменения в структуре водного потока	Колебания уровня поверхности водохранилища, развитие волновых явлений и течений	Нарушение статики берегов	В районе размещения водохранилища
Уменьшение объема твердого стока	Размывы в нижнем бьефе, транзитной зоне и зоне слияния, деградация дельты	Изменение условий развития природной среды и формирование природного ландшафта	От плотины до устья реки
Удержание объема воды в водохранилищах во время весенних и осенних паводков	Расход объема сточных вод при маловодье	Улучшение условий водопотребления	В нижнем бьефе
	Снижение максимальных затрат на воду	Снижение риска наводнений	
		Использование поймы рек	

Горные водохранилища – это качественно новые водохранилища, для которых характерно формирование различных процессов, что обуславливает особый подход к их прогнозированию.

Несмотря на активизацию различных процессов, вызванных экзогенными (внешними) и эндогенными (внутренними) причинами, воздействие горных и равнинных водохранилищ на окружающую среду существенно отличается друг от друга.

При развитии склоновых процессов на горных и предгорных водохранилищах весовое значение воздействия **коэффициента амплитуды** уровня воды (A) – высокое, что связано с большими значениями уровня воды (амплитуда $H > 20$ м) и, соответственно, скоростью движения уровня воды ($V_p > 0,5$ м/сут) (табл. IV.2.2).

Таблица IV.2.2

Ранжирование факторов, влияющих на склоновые процессы водохранилищ

Рейтинг действующих факторов	Ранжирование по типу водохранилища			
	Равнинное	Предгорное	Горное	Высокогорное
1	\mathcal{E}	\mathcal{E}	\mathcal{E}	V_{yp}
2	B	A	V_{yp}	A
3	m	m	A	I
4	$K_{раз}$	$K_{раз}$	m	m
5	H	B	I	\mathcal{E}
6	A	H	$K_{раз}$	$K_{раз}$
7	V_{yp}	V_{yp}	H	H
8	I	I	B	B

где: \mathcal{E} – энергия волн; A – амплитуда сработки уровня воды, м; B – ширина отмели, м; $m = \text{ctg}\alpha$ – уклон склона; $K_{раз}$ – коэффициент размыва породы, м³/т; I – градиент грунтовых вод на склоне; H – высота берега, м; V_{yp} – скорость движения уровня воды, м/сут.

Высокие значения амплитуды уровня воды (A) и скорости движения (V_{yp}) уровня воды на горных водохранилищах определяют:

- в связи с водонасыщением и высыханием грунта изменение свойств грунта берегов во времени;
- расширение зоны взаимодействия берега и воды;
- развитие неблагоприятных условий статической устойчивости откосов, что связано с «облегчением» горных пород при подъеме уровня воды и "утяжелением" – при понижении уровня;
- отсутствие мелководья.

Перечисленные условия обуславливают интенсивность эрозионных, оползневых и разрушительных процессов; изменяется соотношение разных генетических характеристик типов берегов при сработке уровня воды и показателей волнения.

Уменьшается прочность породы при колебаниях уровня воды на горных водохранилищах. Качество состояния породы определяется ее составом, структурой и трещиноватостью, истощением.

Развитие геологических процессов зависит как от эндогенных (внутренних), так и от экзогенных (внешних) факторов.

Величина коэффициента связности сцементированных осадочных пород (конгломератов, песчаников, алевролитов, аргиллитов) уменьшается интенсивнее, чем у более пористых (глинисто-цементных) пород (рис. IV.2.1).

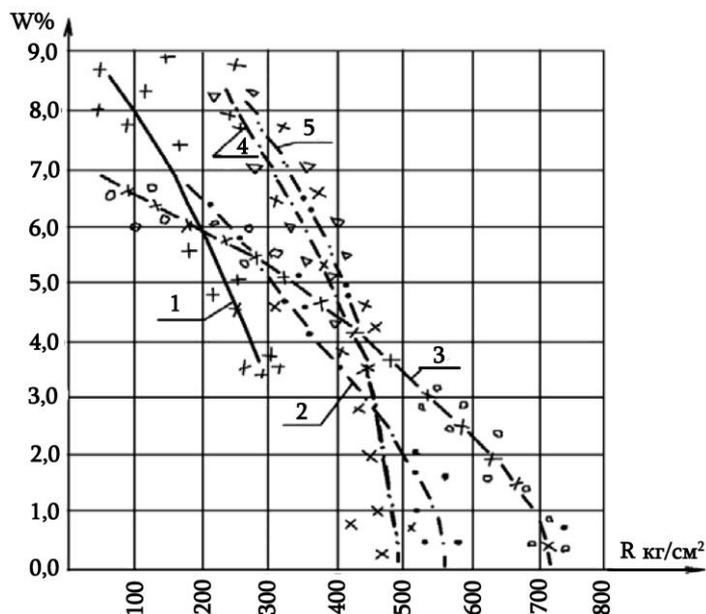


Рис. IV.2.1. Изменение прочностных характеристик песчаников в зависимости от влажности
 1 – выветренные граувакковые песчаники;
 2 – невыветренные граувакковые песчаники;
 3 – граувакковые песчаники;
 4 – выветренные аркозовые песчаники;
 5 – невыветренные аркозовые песчаники

Геодинамические процессы быстрее развиваются в районе, окружающем горное водохранилище. Эта ситуация дополнительно осложняется геологическими процессами, которые вызываются периодическими изменениями уровня воды в водохранилище [Гогелиани Л.Д., 2000; Гутидзе П., 1997; 2000].

В мировой гидротехнике известны **сейсмические явления**, вызываемые горными водохранилищами т.н. «наведенная сейсмичность» (табл. IV.2.3).

Таблица IV.2.3

Формирование землетрясений в результате создания водохранилищ на Земле

Плотина (водохранилище)	Река	Страна	Год заполнения водохранилища (до НПУ)	Объем водохранилища км ³	Максимальная глубина водохранилища, м	Дата землетрясения	Магнитуда
1	2	3	4	5	6	7	8
Коина (Шива-Исагари)	Койна	Индия	1961	2,8	100	10.12.1967	7,0
Кремаста	Ахелой	Греция	1965	4,8	120	24.01.1966	6,3
Касиракион	Крикелио-Тикос	Греция	1969	1,0	100	1969	6,3
Кариба	Замбези	Замбия-Зимбабве	1958–1963	175,0	122	23.09.1963	6,25
Синфинская	Синфинск	Китай	1961	13,9	105	1961	6,1
Оровиль	Оровиль	США	1968	4,4	204	01.08.1975	5,7

1	2	3	4	5	6	7	8
Уарагамба	Уарагамба	Австралия	1960	2,0	104	09.03.1973	5,4
Акосомбо (Вольта)	Вольта	Гана	1964–1967	165,0	109	11.1964	5,3
Порто Колумбия	Рио-Гранде	Бразилия	1973	1,5	50	24.02.1974	5,1
Вольта Гранде	Рио-Гранде	Бразилия	1973	2,3	31	24.02.1974	5,1
Бенмор	Уаитаки	Новая Зеландия	1963–1966	2,0	96	07.07.1968	5,0
Экумбене	Экумбене	Австралия	1958	4,8	106	18.05.1959	5,0
Гувер	Колорадо	США	1935–1936	36,7	191	10.03.1940	5,0
Монтаинар	Драки	Франция	1962	0,3	125	25.04.1963	4,9
Баина-Башта	Дрина	Югославия	1965–1966	0,3	80	03.07.1967	4,8
Кажуру	Пара	Бразилия	1953–1959	0,2	21	23.01.1972	4,7
Канеллис	Ногуэра	Испания	1960	0,7	132	09.01.1962	4,7
Сефидруд	Сефидруд	Иран	1962	1,8	80	02.08.1968	4,7
Пукак	Пукак	Новая Зеландия	1976	10,0	108	1978	4,6
Нурек	Вахш	Таджикистан	1972–1984	11,0	285	27.11.1972	4,5
Кафуэ-Годзи	Кафуэ	Замбия	1973–1978	5,0	62	13.05.1978	4,2
Маникуаган-3	Маникуаган	Канада	1975	10,4	96	23.10.1975	4,1
Ингури	Ингури	Грузия	1957	0,23	100	12.1979	4,4

Изменения тектонического состояния связаны с особенностями геологического строения территории гидроузла. Развитие сейсмических процессов, вызванных водохранилищем, характерно для высоконапорных водохранилищ со значительным объемом.

К деформациям, развивающимся в условиях нарушения режима эксплуатации, наблюдаемым на ряде водохранилищ, относятся: появление трещин в противодиффузионных элементах плотины (ядро, экран, понур); деформация пьезометрических колодцев; возникновение пустот между телом плотины и конструкциями гидроузла; прорыв насыпи тела плотины и откосов водохранилища.

Сейсмические изменения территории, сопровождающие создание водохранилищ, оценивают по-разному: зависимость землетрясения от объема водохранилища; изменение сейсмического состояния в период заполнения и эксплуатации водохранилища.

Территория Грузии расположена на антиклинальной области Большого Кавказа - межгорной впадине Курийской котловины и антиклинальной области Малого Кавказа (рис. IV.2.2). По сейсмическим условиям территория Грузии находится в 6-9 балльной зоне (рис. IV.2.3). В 9-балльной зоне расположены водохранилища Ингурское, Алгетское, Жинвальское, Надарбазевское, Нареквавское, Сионское, Шаорское, Зонкарское, Дманисское, Пантианское, Храмское, Мтисдзирское, Зреское.

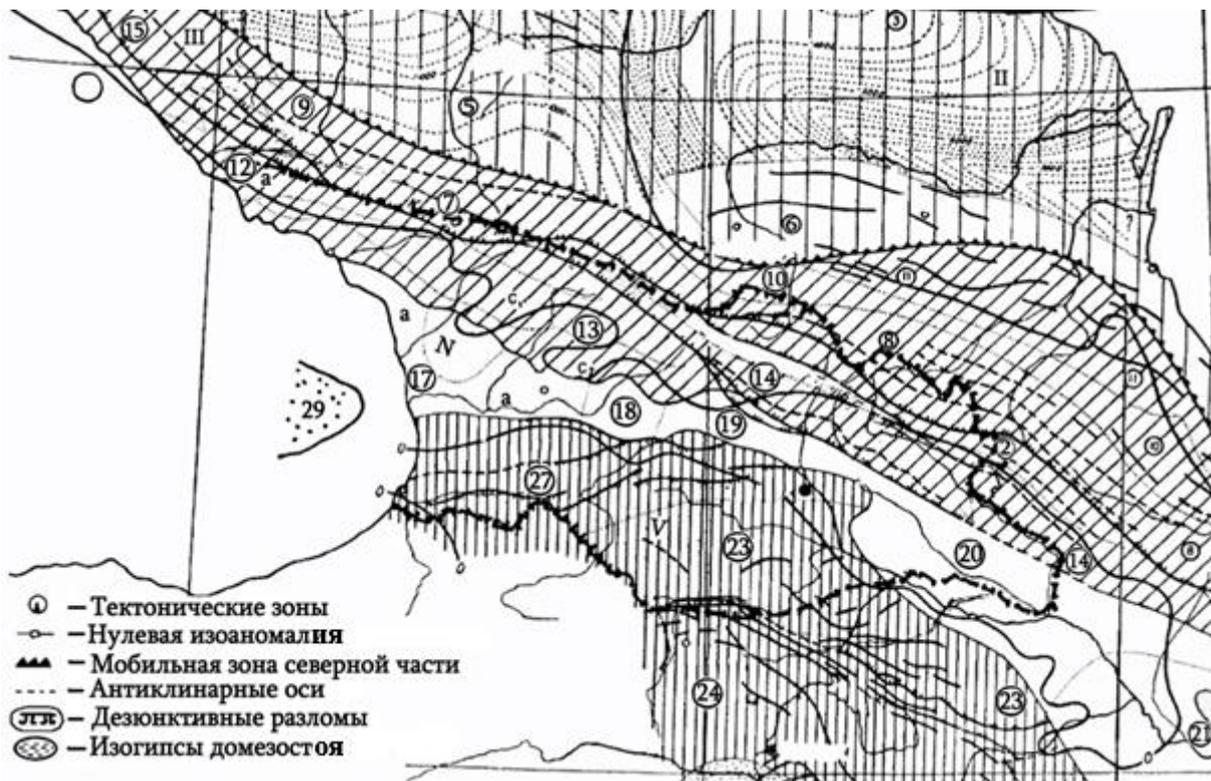


Рис. IV.2.2. Карта структурно-тектонических районов Грузии

Обозначения: II [штриховка] – Предкавказская; III [штриховка] – Большой Кавказский антиклинарий;
 10 – восточная зона северного склона Главного хребта; 13 – западная зона южного склона Главного хребта: а – Абхазия; б – Сванетия; в – Сухуми-Душети (север); в – Кахетинская зона; IV [штриховка] – Зоны Рионско-Курийской депрессии: 17 – Колхидская зона (Колхидская долина и центральный синклиналь); 18 – Долинная зона; 19 – Моласовская зона; 20 – Зона Сагареджо-Шираки-Аджинаури; V [штриховка] – Зоны Малого Кавказа: 22 – Аджарско-Триалетская зона; 23 – Зона Армения-Ганжи-Карабах; VII – Горная.

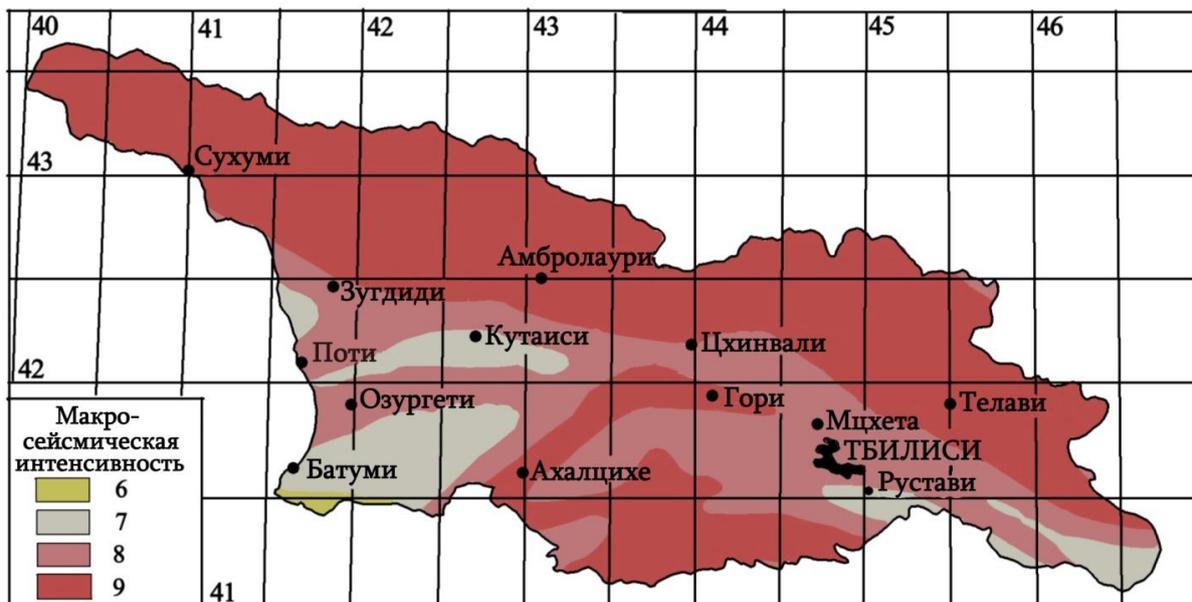


Рис. IV.2.3. Сейсмическое районирование территории Грузии

При анализе наблюдений на Ингурском водохранилище установлено, что при повышении уровня воды до 130 м - общее количество землетрясений в районе гидроузла по сравнению с фоновой сейсмичностью возросло до 4 баллов. Процесс сейсмичности, вызванной водохранилищами, изучался сейсморазведочными наблюдениями путем построения подводного геофизического профиля [Чоговадзе Г.Н., Мchedlishvili И.М., Ломов И.Е., 1987; Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Канделаки Н., Биланишвили Л.. 2022 (на грузинском языке)]. В апреле 1978 г. при заполнении водохранилища до отметки ∇ 345 м (глубина 105 м) сейсмический режим активизировался (рис. IV.2.4).

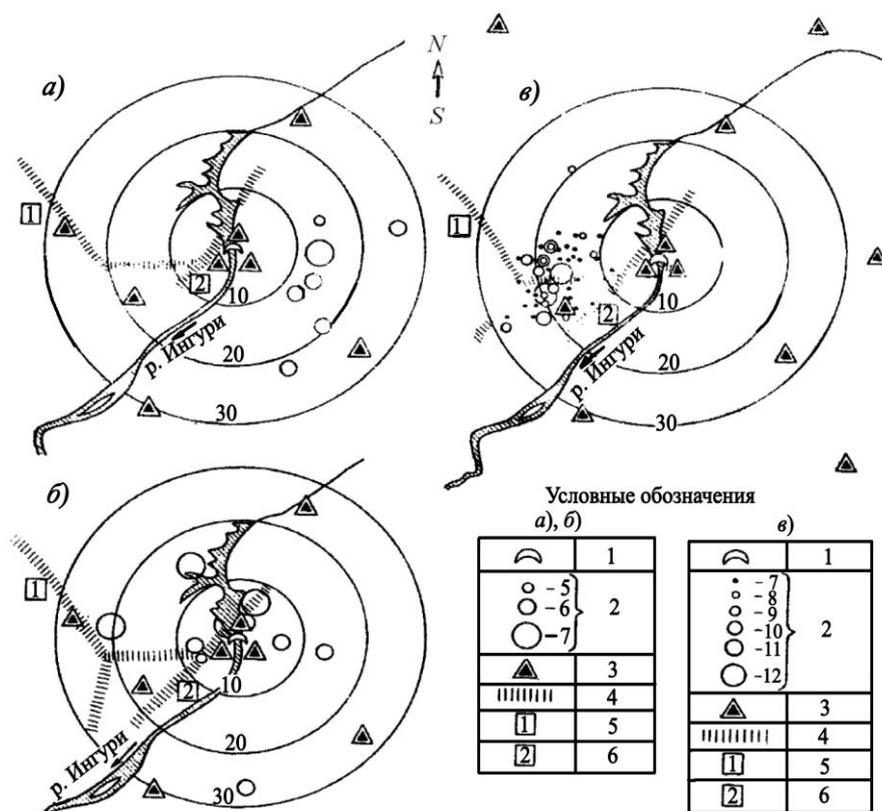


Рис. IV.2.4. Карта эпицентров сейсмических толчков в радиусе 30 км от арочной плотины Ингурского водохранилища

а) начальный период заполнения водохранилища, апрель 1978 г.; б) то же - май 1978 г.; в) через год после заполнения водохранилища, 21-31 декабря 1979 г.; 1 – арочная плотина; 2 – эпицентры землетрясений разных классов; 3 – сейсмостанции; 4 – сейсмогенные станции; 5 – Ткварчельская флексура; 6 – Ингурский разлом; 10, 20, 30 – расстояния от плотины (км)

Процессы затопления, подтопления и фильтрации

Зона затопления территорий располагается от меженного уровня воды в реке до отметки НПУ водохранилища. В течение года в условиях горного района затопление изменяется в значительных пределах и стабилизируется на отметке НПУ не более 30-60 дней в году. Потери земли из-за затопления в горных районах значительно меньше, чем в равнинных. Если в водоносных равнинных горизонтах при затоплении площади 1 км² в среднем аккумулируется до 4 млн м³ речного стока, то в горных районах этот показатель достигает 45 млн м³ (табл. IV.2.4).

Таблица IV.2.4

Показатели эффективности водохранилищ Грузии

№	Водо-храни-лище	Место-расположе-ние (район)	Река	Полный объем, $V_{полн}$, млн м ³	Площадь затопления (в т.ч. сельскохозяйственные угодья), $S/S_{зат.}$ км ²	Пойменная зона, $F_{мел.}$, км ²	Затопление			Затопление водосборной площади, %
							Для создания 1 млн м ³ $V_{полн}/S_{зат.}$, млн м ³ /км ²	Для орошения 1 км ² , $S_{орозн}/S_{зат.}$	Для обеспечения выра-ботки электроэнергии 1 млн кВтч, $W_{эл}/S_{зат.}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Жинваль-ское	Душетский	Арагви	520,0	11,60/5,20	0,08	44,82	32,85	43,10	0,75
2	Сионское	Тианетский	Иори	325,0	11,40/3,90	0,05	28,47	46,84	9,21	3,73
3	Храмское	Цалкский	Храм	312,0	34,0/25,0	2,896	9,18	0,048	6,38	3,23
4	Тбилис-ское	Г. Тбилиси	Иори	308,0	12,50/-	0,66	24,64	12,00	-	-
5	Далис-мта	Дедоплис-цкаройский	Иори	140,0	15,01/-	0,05	9,33	4,00	-	0,70
6	Алгетское	Гетрицка-роиский	Алгети	65,0	2,50	0,06	26,00	58,00	-	0,77
7	Джандар-ское	Гардабан-ский	Гардабан-ский М.К.	52,0	12,50	2,70	4,16	6,00	-	-
8	Лиахвское	Цхинваль-ский	Лиахви	40,0	1,40	0,20	28,57	150,00	-	0,52
9	В-ща $V_{полн}=40\div 10$ млн м ³	Три в-ща	Бассейн р. Кура	32,0	4,65	-	6,88	39,78	4,44	-
10	В-ща $V_{полн}=10\div 1$ млн м ³	Шестнадцать в-щ	Бассейн р. Кура	47,86	11,61	-	4,12	1,72	-	-
11	В-ща $V_{полн}<1$ млн м ³	Девятнадцать в-щ	Бассейн р. Кура	2,21	11,38	-	1,60	1,16	-	-
Всего в бассейн р. Кура (Восточная Грузия)				1844,07	118,54/34,1	7,21	сред. 14,47	сред. 14,94	сред. 8,63	сред. 0,354
1	Ингурское	Цаленджих-ский	Ингури	1090,0	13,50/1,46	0,16	80,74	-	309,63	0,425
2	Гальское	Гальский	Ингури, Эрисцкали	145,0	8,0/-	0,10	18,13	-	117,50	0,045
Всего в бассейне р. Ингури				1235,0	21,50/1,46	0,26	50,35	-	238,14	0,52
3	Шаорское	Амбролаур-ский	Шараула	90,0	13,20/-	1,00	6,89	-	9,09	10,50
4	Ткибуль-ское	Чхарский	Ткибула	84,0	11,50/-	1,72	7,30	-	13,13	0,94

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	Гуматское	Цхалтубский	Риони	39,0	1,40/-	0,04	16,25	-	67,92	0,065
6	В-ща V _{полн} <40 млн м ³	Три в-ща	Риони	41,10	6,77/-	0,76	6,07	0,33	176,96	-
Всего в бассейне р. Риони				254,10	32,87	3,52	сред. 7,73	сред. 0,33	сред. 49,65	сред. 0,00007
Всего в Западной Грузии				1489,1	54,37/72,92	3,78	сред. 27,39	-	сред. 124,99	сред. 0,166
Всего в Грузии				3323,1	172,9/37,0	10,99	сред. 19,12	сред. 19,22	сред. 16,87	сред. 0,248

Макросейсмическая энергия Ингурских землетрясений учтена при оценке сейсмической активности при проектировании Ингурского водохранилища (фоновая сейсмичность оценивалась в 8 баллов). Наполнение водохранилища лишь приблизило начало землетрясений, что было обусловлено периодом тектонического развития района. Вызванные сейсмические процессы на других крупных и глубоких водохранилищах Грузии не наблюдались.

В настоящее время сложно объяснить характер сейсмической активизации в связи с созданием водохранилищ большой глубины и объема. Понятно, что это связано с изменением напряжения горных пород, концентрацией напряжения в зоне разлома, что вызвано воздействием нагрузки от создания водохранилища, увеличением гидростатического давления, изменение теплового режима горных пород и др.

При оценке **подтопления** подземными водами необходимо определить условия их питания и стока в естественных условиях и после ввода водохранилища в эксплуатацию; необходимо охарактеризовать климат региона. В этом аспекте колебания уровня воды в водохранилище оказывают существенное влияние на уровни водоносных горизонтов и динамику общего процесса.

При создании водохранилища из-за подтопления уровень грунтовых вод поднимается до отметки, при которой вода может стекать обратно в водохранилище. Подъем уровня грунтовых вод довольно медленный и непостоянный. Продолжительность формирования может длиться от нескольких месяцев до нескольких лет, особенно при значительном изменении уровня воды в водохранилище. Сработка уровня вызывает понижение уровня грунтовых вод в водохранилище, которое продолжается до тех пор, пока не начнется новый подъем уровня воды в водохранилище. Из-за значительной скорости движения уровня воды в горных водохранилищах изменение уровня грунтовых вод отстает от движения уровня воды в водохранилище, что приводит к осушению близлежащих территорий. Ширина зоны подтопления грунтовыми водами может изменяться в пределах нескольких десятков километров.

Наибольшая высота подтопления грунтовых вод наблюдается у плотины водохранилища и постепенно уменьшается у ее истока. Также постепенно сужается зона распространения подтопления.

Скорость подтопления грунтовыми водами и их объем зависят от фильтрующих свойств горных пород, степени их водонасыщенности, высоты подтопления реки и уровня режима водохранилища. Скорость подъема уровня грунтовых вод и степень их распространения, в основном, определяются геологической обстановкой.

Фильтрация со дна горных водохранилищ зависит от геологических условий и уровня режима.

По наблюдениям, при значительных колебаниях уровня воды в водохранилище развитие фильтрации происходит неравномерно и может распространяться на расстояние в несколько десятков километров.

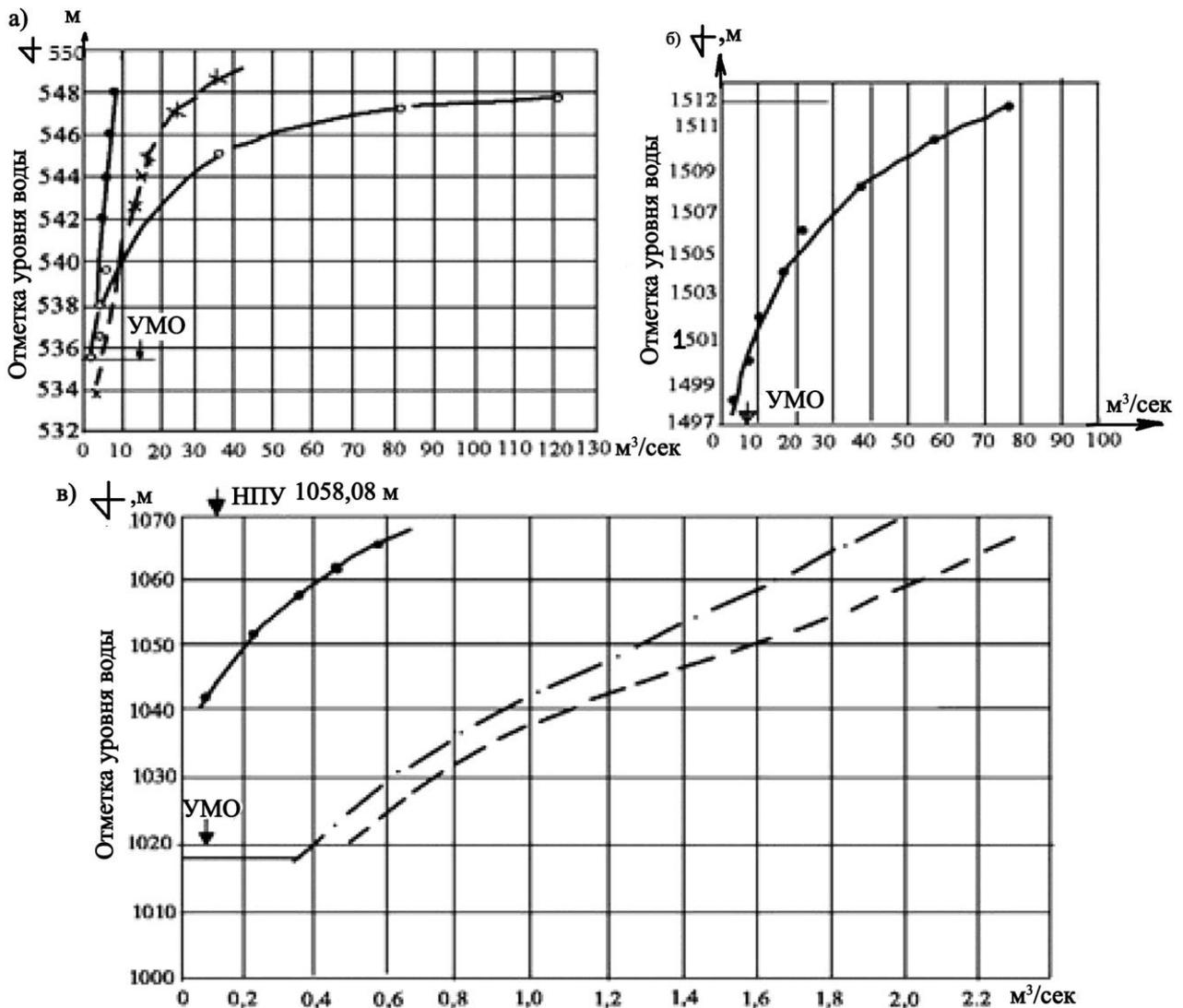


Рис. IV.2.5. Зависимость потерь воды на фильтрацию от уровня в водохранилище

- а) Тбилисское водохранилище: ——— — через 2 года после ввода в эксплуатацию; × — через 15 лет после ввода в эксплуатацию; 0 — расчетные точки после цементирования;
 б) Храмское водохранилище: • — расчетные точки; в) Сионское водохранилище: ——— — фильтрация в плотине; —•— — прочие годовые потери; - - - - - общие потери на фильтрацию.

При заполнении водохранилища скорость фильтрации рассчитывается по следующей формуле:

$$q_{\phi} = q_0 + 2h_0K_{\phi}\sqrt{tma}, \quad (\text{IV.2.1})$$

где h_0 – начальный уровень грунтовых вод; m – среднее значение толщины грунтового слоя; $a = K_{\phi}m/\mu$; μ – коэффициент водообеспеченности; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации; t – время.

На ряде горных водохранилищ Грузии установлена зависимость между скоростью фильтрации и уровнем воды в водохранилище (рис. IV.2.5). Вынос солей фильтрационными потоками на Тбилисском водохранилище вызвал деформацию двух бетонных платин, что привело к необходимости цементирования пород в основаниях и укрепления берегового откоса каменным контрбанкетом.

В нижнем бьефе Шаорского водохранилища имеется 4 фильтрационных потоков, суммарный расход двух потоков составляет 0,5 м³/с (фото IV.2.1).

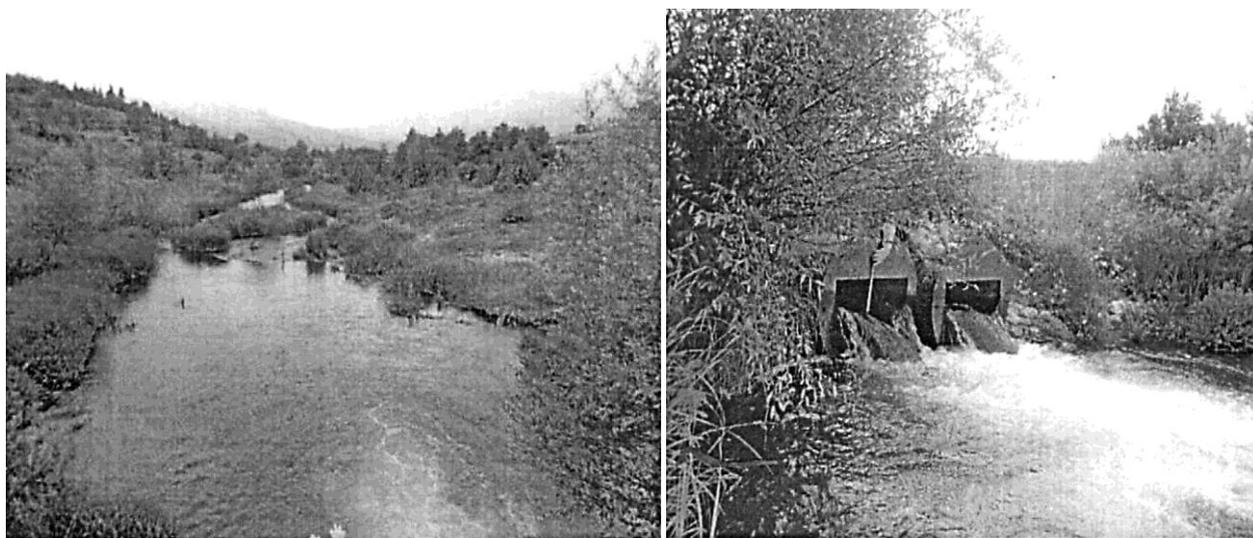


Фото IV.2.1. Фильтрационные потоки из Шаорского водохранилища в нижнем бьефе

Из-за фильтрационных потоков из Тбилисского водохранилища и затопления Глданского района г. Тбилиси уровень водохранилища понизили на 10,0 м. При этом полный объем водохранилища $V_{\text{полн}} = 215,2$ млн м³, мертвый объем – $V_{\text{мерт}} = 150,17$ млн м³, площадь зеркала – $F = 108,0$ м², максимальная глубина – $H_{\text{max}} = 37,0$ м (проектные – $V_{\text{полн}} = 308,0$ млн м³, $F_{\text{проект}} = 11,0$ км², $H_{\text{проект}} = 45,0$ м).

В нижней части Сионской плотины, при высоких уровнях воды в водохранилище, в подвалах зданий левого берега и на прилегающих участках земли наблюдался подъем уровня грунтовых вод и зафиксировано несколько фильтрационных потоков (фото IV.2.2).

а)

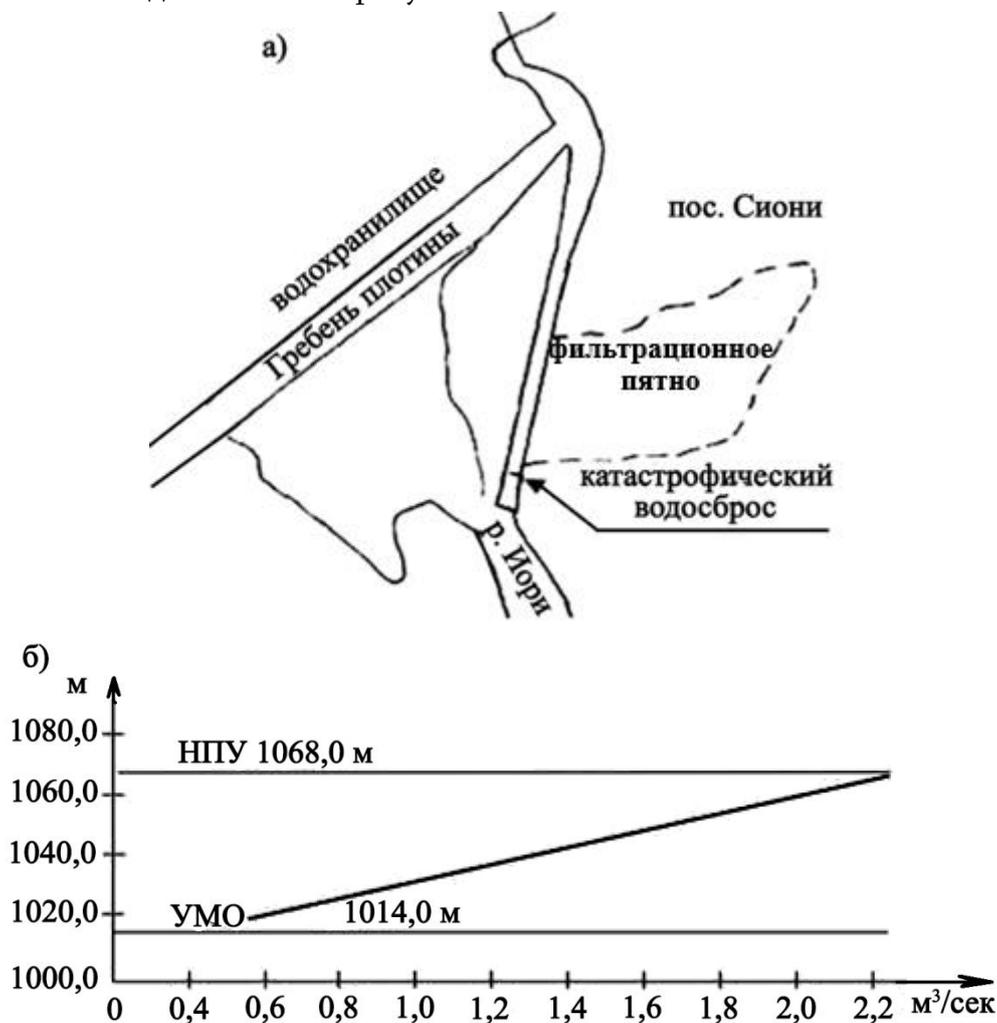


б)



**Фото IV.2.2. Просачивание фильтрационных вод из Сионского водохранилища
а) на левом берегу катастрофического водосброса, б) на правом берегу
катастрофического водосброса**

На основании проведенного мониторинга на Сионской платине установлено, что вода в пьезометрах высокоминерализованная – гидрокарбонатно-натриево-калиевая. Отметка кривой депрессии в теле плотины увеличивается по направлению к левому берегу, что свидетельствует об усилении процессов суффозии в ядре плотины. Потери отфильтрованных вод показаны на рисунке IV.2.6.



**Рис. IV.2.6. Расходы фильтрации воды из Сионского водохранилища
а) - фильтрационное пятно; б) - зависимость потерь воды на фильтрацию от уровня
зеркала воды водохранилища**

Подтопление при резком изменении уровня воды в предгорных и горных районах развивается при необратимых изменениях поверхностных прибрежных территорий.

Интенсивность процесса подтопления определяется расположением уровня грунтовых вод. Можно выделить: зоны сильного подтопления (уровень грунтовых вод до 1 м); зоны умеренного подтопления (уровень грунтовых вод 1÷2 м); зоны слабого подтопления (уровень грунтовых вод 2÷3 м); участки, сложенные слабопроницаемыми отложениями (тяжелые суглинки, глины) возвышаются на 3-4 м над уровнем водохранилища.

Протяженность площади **затопления** грунтовыми водами зависит от высоты подтопления, режима заполнения и сработки уровня воды водохранилища, морфологии и механического состава прибрежных пород, характера его залегания, фильтрационных свойств грунтов и других факторов. Потери воды из водохранилища можно определить как возвратные и необратимые (табл. IV.2.5).

Таблица IV.2.5

Расчетные значения потерь воды из-за фильтрации водохранилищ

№	Водохранилище	Напор, м	Потери на фильтрацию, м³/сек
1	Храмское (Цалкское)	25	0,8-3,75
2	Ингурское	230	2,0
3	Сионское	68	2,0
4	Тбилисское	45	0,12

Основными особенностями фильтрационных процессов на горных водохранилищах являются: нестабильный характер фильтрации при заполнении водохранилищ, из-за чего процесс стабилизации длится 10-20 лет; в период эксплуатации водохранилища, при заполнении и сработке уровня - фильтрационные потери между отметками НПУ и УМО становятся знакопеременными, что позволяет управлять процессами фильтрации и подтопления.

Объем подземных вод, поступающих в водохранилище (W_{ϕ}), можно рассчитать по следующей зависимости:

$$W_{\phi} = \sum_{k=1}^n l_{\phi} h_{cp} L_{\phi} \mu, \quad (IV.2.2)$$

где l_{ϕ} – длина зоны фильтрации при нормальном уровне воды в водохранилище; h_{cp} – среднее изменение уровня грунтовых вод при колебаниях уровня воды в водохранилище, в пределах сработки уровней НПУ-УМО; L_{ϕ} – длина характерного участка водохранилища; $\Sigma(L_{\phi})$ – длина периметра водохранилища); μ – активная пористость почвы (коэффициент водоотдачи) в средней части участка; n – количество участков.

Задачи исследования **внутриводоемных процессов** в горных водохранилищах можно сформулировать следующим образом: интерпретация существующих и разработка новых методов расчетов с учетом специфики генетического типа горных водохранилищ; учет

зональных и азональных факторов; комплексное изучение внутриводоемных процессов.

На основе анализа существующих методов расчета внутриводоемных процессов выделяют следующие положения: метод определения элементов водного баланса практически одинаков для всех типов водохранилищ. Географическая зональность не влияет на соотношение компонентов водного баланса; потери воды на испарение практически не учитываются; объем накопления и вытекания воды зависит от двух режимов – наполнения и опорожнения водохранилища; волнообразование, интенсивность размыва берегов и накопление наносов в водохранилище, изменение показателей качества воды зависят от уровня режима водохранилища.

Прогнозирование изменения процессов **водообмена** в водохранилище является довольно сложной задачей.

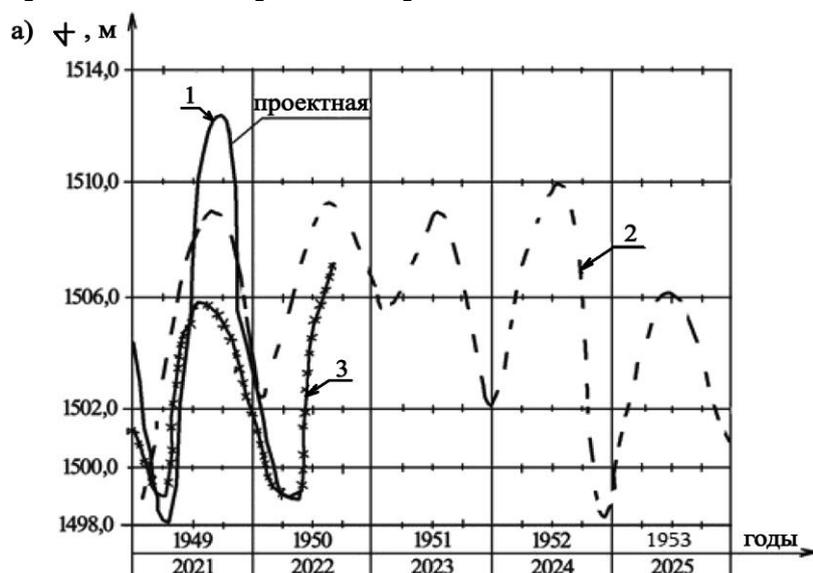
Течения в водохранилище определяются по данным наблюдений в сочетании волновыми процессами.

Волновые процессы являются важнейшими факторами взаимосвязи водохранилища и окружающей среды.

Развитие волнения на горных водохранилищах зависит от сложной морфологии берегов и их значительного уклона, малых разгонов волн и т. д.

В отличие от равнинных водохранилищ, волновые процессы в горных водохранилищах зависят от следующих условий: сложной конфигурации и изрезанности берегов, благодаря чему на поверхности возникает трехмерное волнение; из-за малой площади водохранилища и малого объема воды волны на поверхности горных водохранилищ быстро появляются и исчезают; условия сработки уровня воды определяют специфику волнообразования; изменения скорости (силы) и направления ветра определяют резкие изменения параметров волн во времени.

Особенности внутриводоемных процессов в горных водохранилищах определяются уровнем и нагонным режимом, процессами водообмена, течениями, ветровым режимом. Уровень режим горных водохранилищ характеризуется общими свойствами – наполнение и опорожнение водохранилищ (рис. IV.2.7÷IV.2.14).



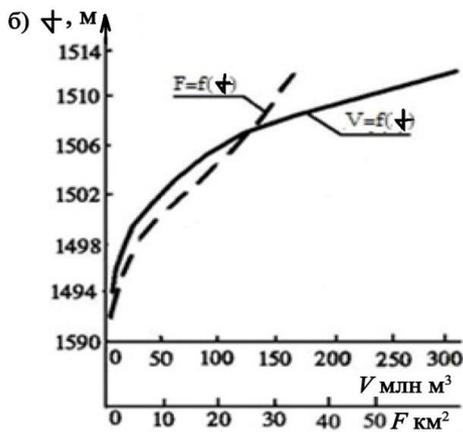
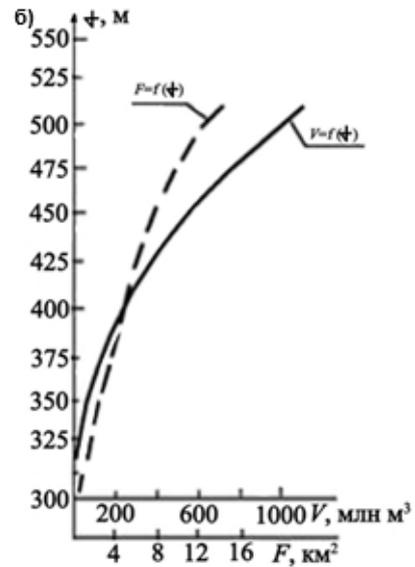
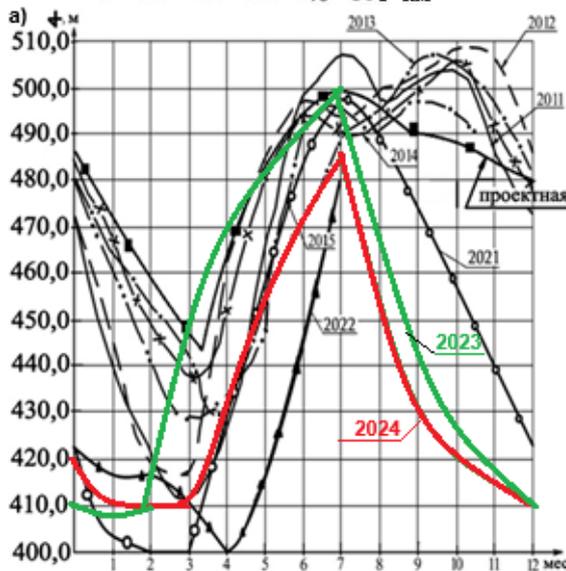


Рис. IV.2.7. Характерные элементы
уровенного режима Храмского (Цалкского)
водохранилища

а) хронологические графики изменения
уровня: 1) — проектный; 2) 1949-1953
гг.;

3) —x—x— 2021-2022 гг.;

б) зависимость объема (V) и площади
зеркала (F) от глубины (h)



IV.2.8. Характерные элементы уровня режима Ингурского (Джварского) водохранилища

а) хронологический график изменения уровня; ■ - проектный; — 2011 г.; - - - 2012 г.;
-•- 2013 г.; -x- 2014 г.; -••- 2015 г.; —o— 2021 г.; -▲- 2022 г.; - 2023 г.; - 2024 г.

б) зависимость объема (V) и площади зеркала (F) от глубины (h)

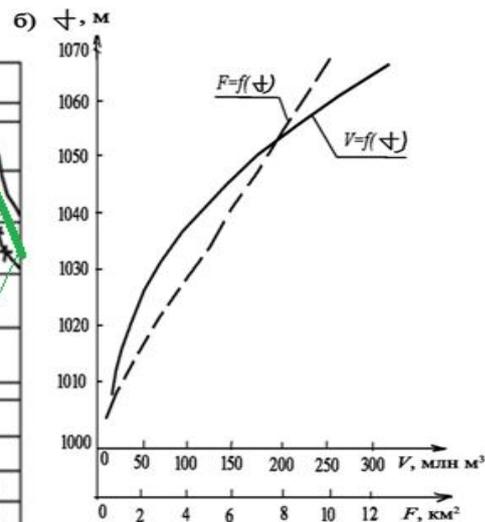
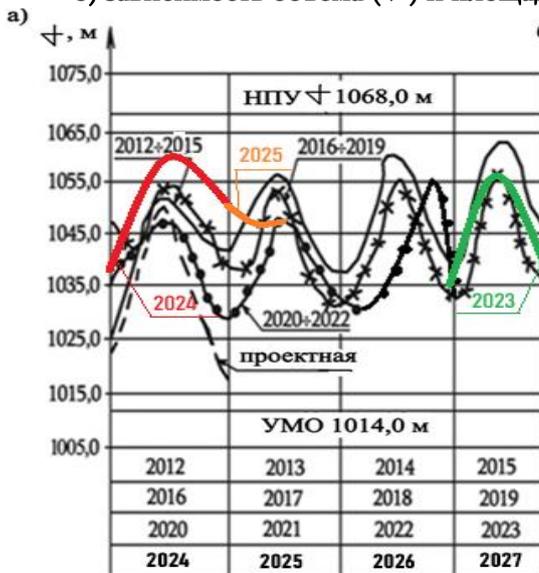


Рис. IV.2.9. Характерные элементы Сионского водохранилища

а) хронологические графики колебаний уровня: — проектный; — 2012-2015 гг.;

-x-x-x- 2016-2019 гг.; —••••• 2020-2022 гг.; — 2023 г.; — 2024 г.; — 2025 г.

б) зависимость объема (V) и площади зеркала (F) от глубины (h)

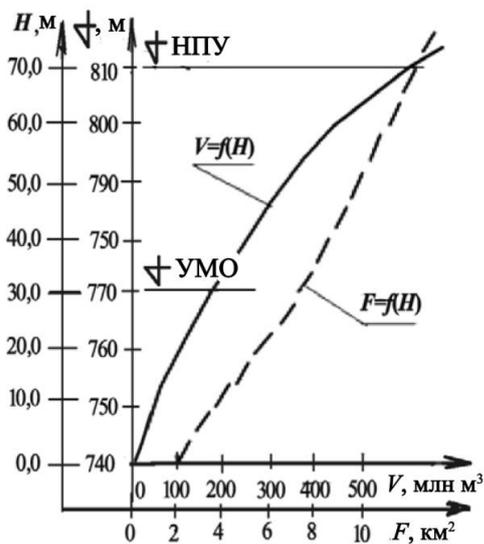
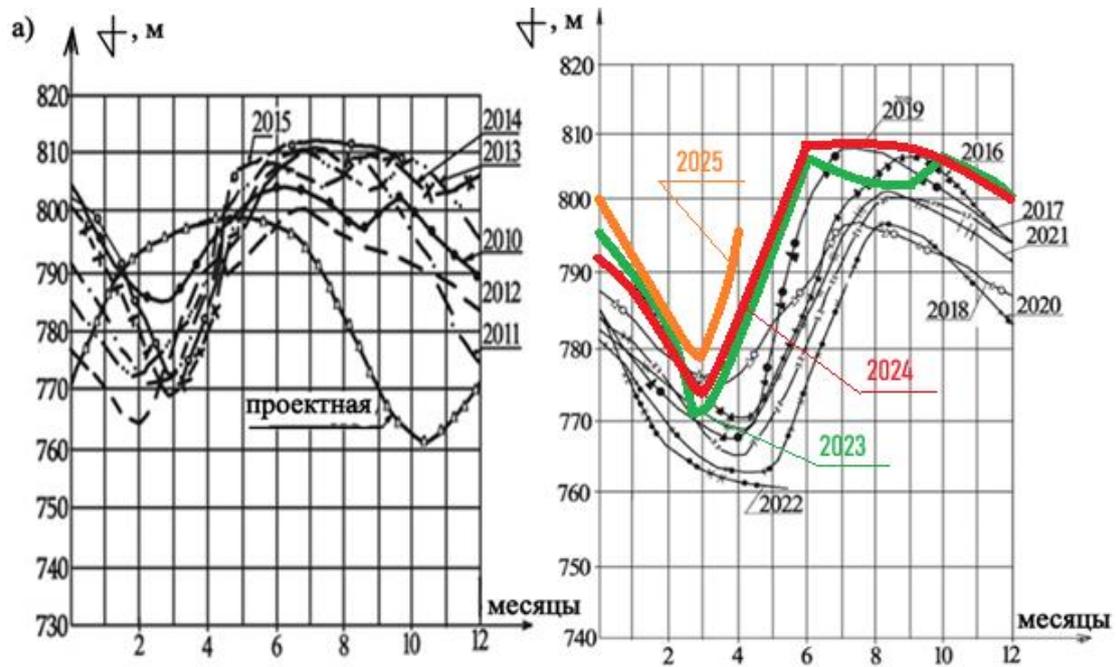


Рис. IV.2.10. Характерные элементы уровня режима Жинвальского водохранилища
 а) хронологические графики изменения уровня;
 Δ - Δ - Δ проектный; \bullet - \bullet - \bullet 2010 г.; \bullet - \bullet 2011 г.; --- 2012 г.; \bullet - \bullet 2013 г.; \times - \times 2014 г.;
 \circ - \circ 2015 г., \blacktriangle - 2016 г.; \times \times - 2017 г.;
 Δ \circ - 2018 г.; \blacktriangle \bullet - 2019 г.;
 \bullet \times - 2020 г.; +++ - 2021 г.;
 \bullet - \bullet \times \times - 2022 г.; - 2023 г.; - 2024 г.; - 2025 г.
 б) зависимость объема (V) и площади поверхности зеркала (F) от глубины (H).

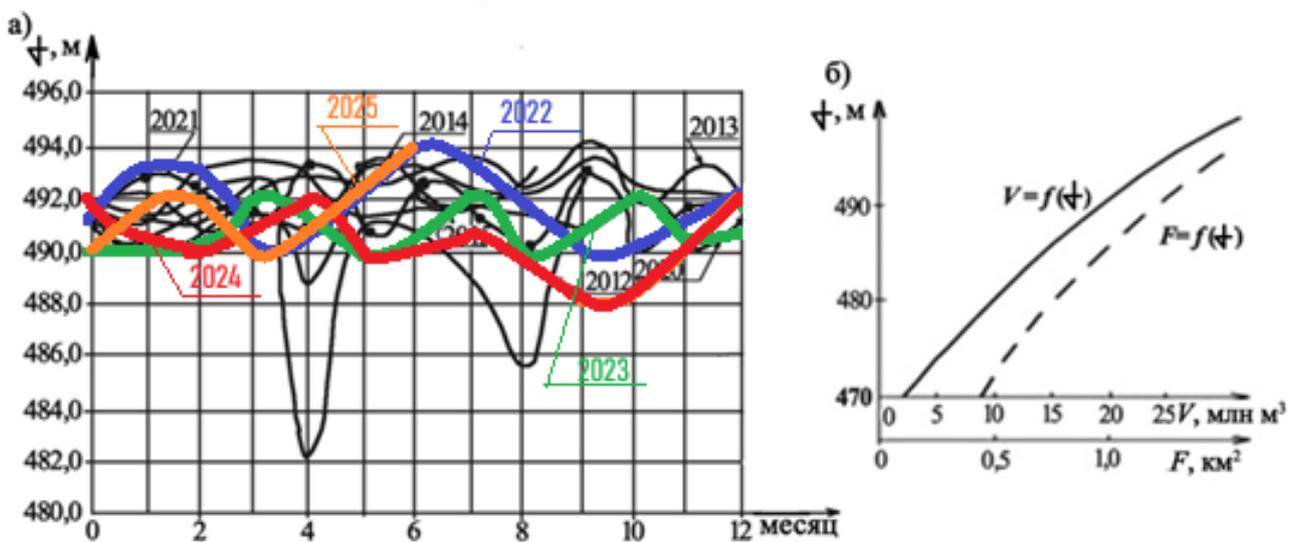


Рис. IV.2.11. Характерные элементы уровня режима Ладжанурского водохранилища
 а) хронологические графики изменения уровня;
 б) Зависимость объема (V) и площади зеркала (F) от глубины (H)

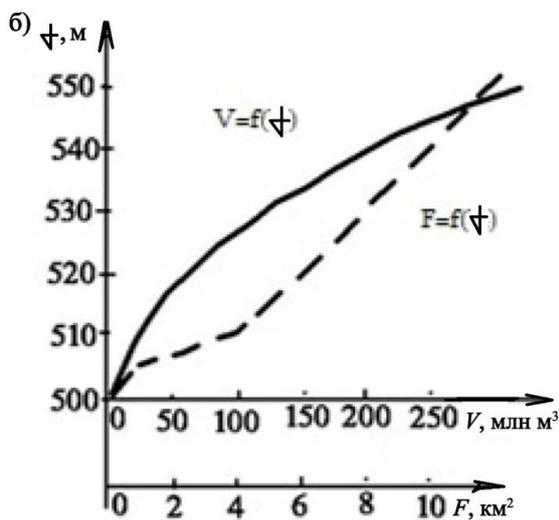
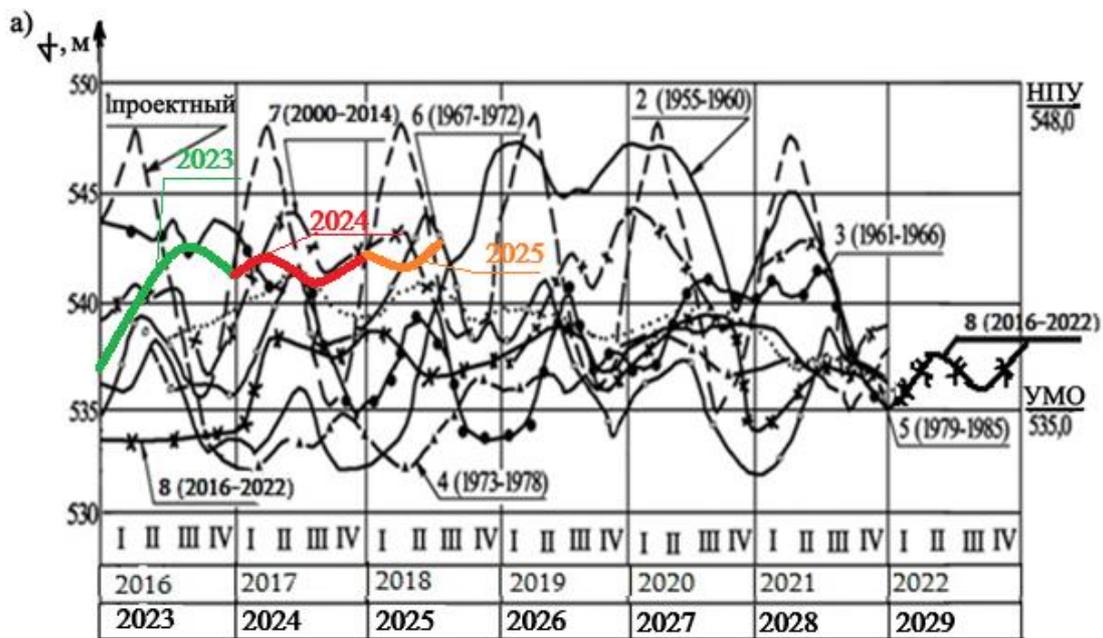


Рис. IV.2.12. Характерные элементы уровня режима Тбилисского водохранилища

- а) хронологические графики изменения уровня (1- проект; 2 –1955-1960 гг.; 3 – 1961-1966 гг.; 4 – 1973-1978гг.; 5 – 1979-1985 гг.; 6 – 1967-1972 гг.; 7 – 2009-2014 гг.; 8 – 2016-2022 гг.; 9 – 2022-2025 гг.
 б) зависимость объема (V) и площади зеркала зона (F) от глубины (H)

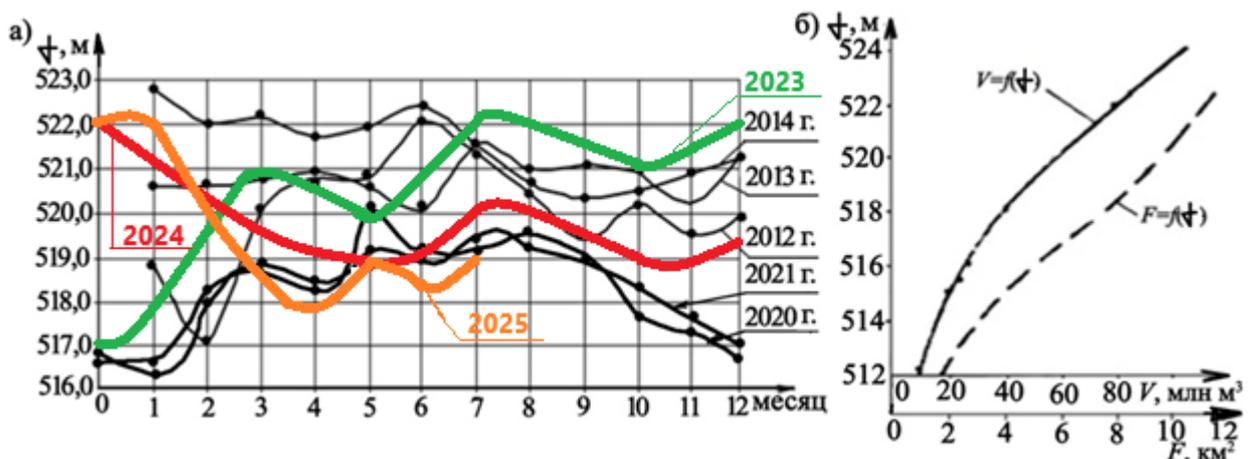


Рис. IV.2.13. Характерные элементы уровня режима Ткибульского водохранилища
 а) хронологические графики изменения уровня;
 б) зависимость объема (V) и площади зеркала зона (F) от глубины (H)

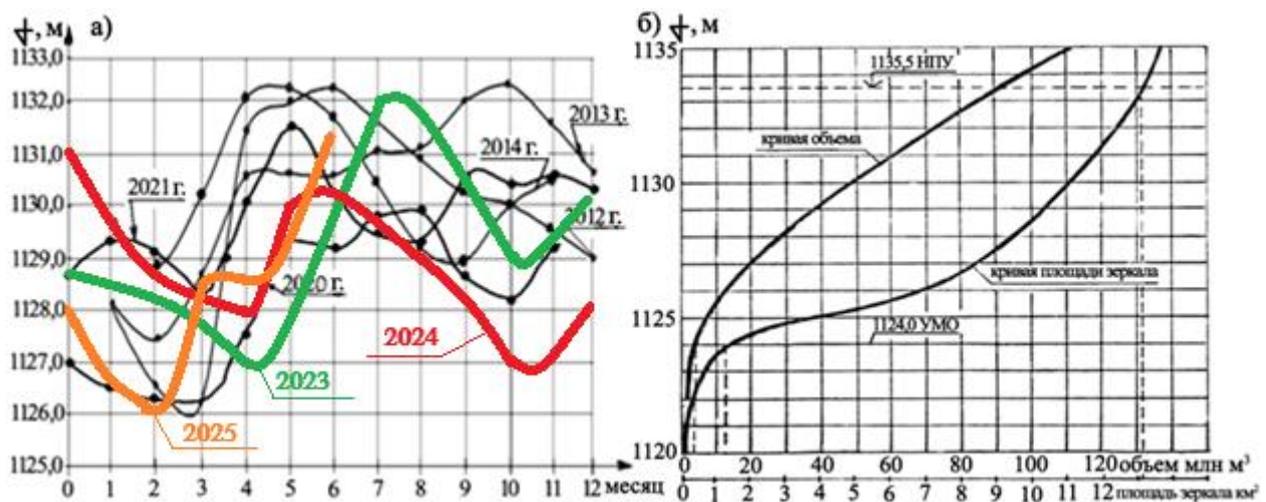


Рис. IV.2.14. Характерные элементы уровненного режима Шаорского водохранилища
 а) хронологические графики изменения уровня;
 б) зависимость объема (V) и площади зеркала зона (F) от глубины (H)

Средняя расчетная глубина воды в водохранилище (H_{cp}) может быть определена по формуле:

$$H_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i t_i}{nT}, \quad (IV.2.3)$$

где H_i – значение глубины воды в водохранилище в разные периоды; t_i – время стояния уровня воды; n – количество случаев изменения уровня; T – усредненный период.

Объем водохранилища (V) и площадь зеркала воды (F) определяются соотношениями:

$$V = K_V H^{a_p}, \quad (IV.2.4)$$

$$F = K_V \cdot a_p H^{a_p - 1}, \quad (IV.2.5)$$

где K_V – коэффициент объема ($K_V = 1,6 \div 2,5$); a_p – коэффициент горности водохранилища.

Значение коэффициента горности (a_p) определялось путем обработки данных ряда водохранилищ (рис. IV.2.15). Зависимость (IV.2.4) можно представить в следующем виде:

$$\lg V = \lg K_V + a_p \lg H \quad (IV.2.6)$$

Первая производная формулы (IV.2.6) позволяет определить площадь зеркала водохранилища $F = K_V \cdot a_p H^{a_p - 1}$, которая может быть представлена следующим линейным уравнением: $\lg F = (\lg K_V + \lg a_p) + (a_p - 1) \lg H$, где (\lg) – отрезок, отсеченный от оси ординат, есть величина $(\lg K_V + \lg a_p)$, логарифм угла наклона линии имеет значение на графике $(a_p - 1)$ (рис. IV.2.15).

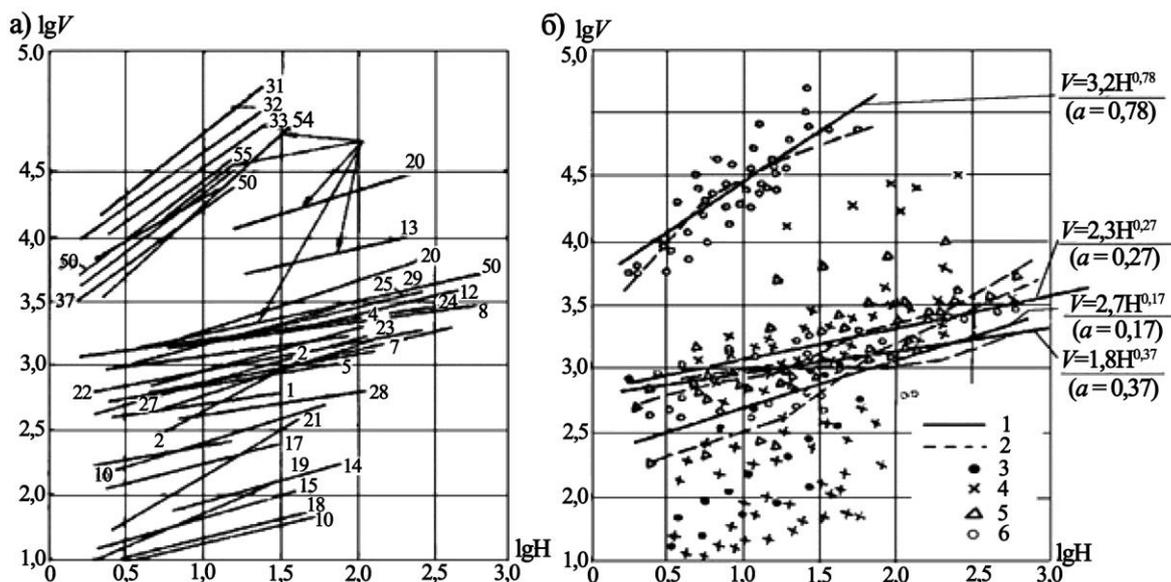


Рис. IV.2.15. Зависимость объема (V) от глубины (H) водохранилища

- а) 1÷30 – горные водохранилища; 31÷39 – равнинные водохранилища (наименования водохранилищ приведены в табл. IV.2.6); б) 1 – эмпирические линии регрессии; 2 – теоретическая линия регрессии; 3 – водохранилища равнинного и озерного типа; 4 – горные водохранилища; 5 – предгорные водохранилища; 6 – высокогорные водохранилища.

Изменение значения (a_p) зависит от рельефа местности расположения водохранилища. С увеличением горности водохранилища угол наклона кривых $V = f(H)$ и $F = f(H)$ увеличивается. Эти показатели можно получить при характеристике водохранилищ по типу местности. Взаимосвязи значений (K_V) и (a_p) позволяют охарактеризовать классификацию водохранилищ по степени «горности» (табл. III.1.8).

Нагонные явления в горных водохранилищах весьма незначительны. Даже при максимальной длине разгона волн, которая на горных водохранилищах Грузии не превышает 10 км, размер ветрового и волнового нагона может достигать 0,5 м (табл. IV.2.6).

Внешний водообмен, в основном, зависит от количества воды, поступающей из водосбора.

Внутренний водообмен определяется различными процессами, развивающимися в самом водоеме – течениями, перемешиванием, волнением.

Основными видами **течений в горных водохранилищах** являются: проточные течения – наблюдаются в средней части водохранилища и вызываются притоком больших объемов речной воды; приливно-отливные течения – вызываются волнами и определяют движение водных масс вдоль берега; течения, образующиеся в придонных слоях, обусловлены наличием в потоке мелкофракционных частиц ила.

Бароградиентные, сейсмические, инерционные течения – в силу особенностей морфометрии в малых горных водохранилищах практически не наблюдаются.

Значения нагонного режима на горных водохранилищах Грузии

Водохранилище	Волноопасное направление, румбы	Максимальная скорость ветра, м/сек	Длина волны, м	Осредненная глубина по разбегу волны, м	Самая высокая зарегистрированная высота волны, м	Расчетная высота волны 1%-ой обеспеченности, м		Высота ветрового нагона, м
						На глубокой воде	В зоне обрушения	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Гальское	Восток	20	6,0	30	0,8	1,2	1,0	0,25
Шаорское	Юго-Запад	20	5,0	10	0,8	1,2	1,0	0,34
Ткибульское	Северо-востоку	30	6,0	16	1,0	1,5	1,2	0,40
Сионское	Северо-запад	20	6,0	33	0,5	1,1	0,8	0,30
Тбилисское	Северо-запад	30	9,0	20	1,3	1,6	1,4	0,51
Храмское	Северо-запад	28	8,7	11	1,1	1,5	1,2	0,41

Горизонтальные течения наблюдаются во время паводков. Течения развиваются на участках и бывших врезов русел рек. Основное воздействие этого типа течений заключается в повышении возможности образования взвешенных потоков, что способствует перемещению наносных отложений и их накоплению вблизи плотины, а также выносу мелких фракций наносов в нижний бьеф плотины ГЭС.

Ветровые течения образуются при сильных ветрах, в осенне-зимний период. В горных водохранилищах они довольно редки. Направление течения совпадает с направлением ветра, а скорость не превышает 0,5-1% скорости ветра. Эти течения наблюдаются только в поверхностном слое воды толщиной не более 1,5 м.

При развитии вдольбереговых ветров образуются **вдольбереговые течения**. В связи с сильной изрезанностью береговой линии в горных водохранилищах течения вдоль берега не имеют широкого распространения и практически не играют существенной роли. На ряде водохранилищ Грузии выделяются основные особенности течений, которые можно свести к следующему (рис. IV.2.16).

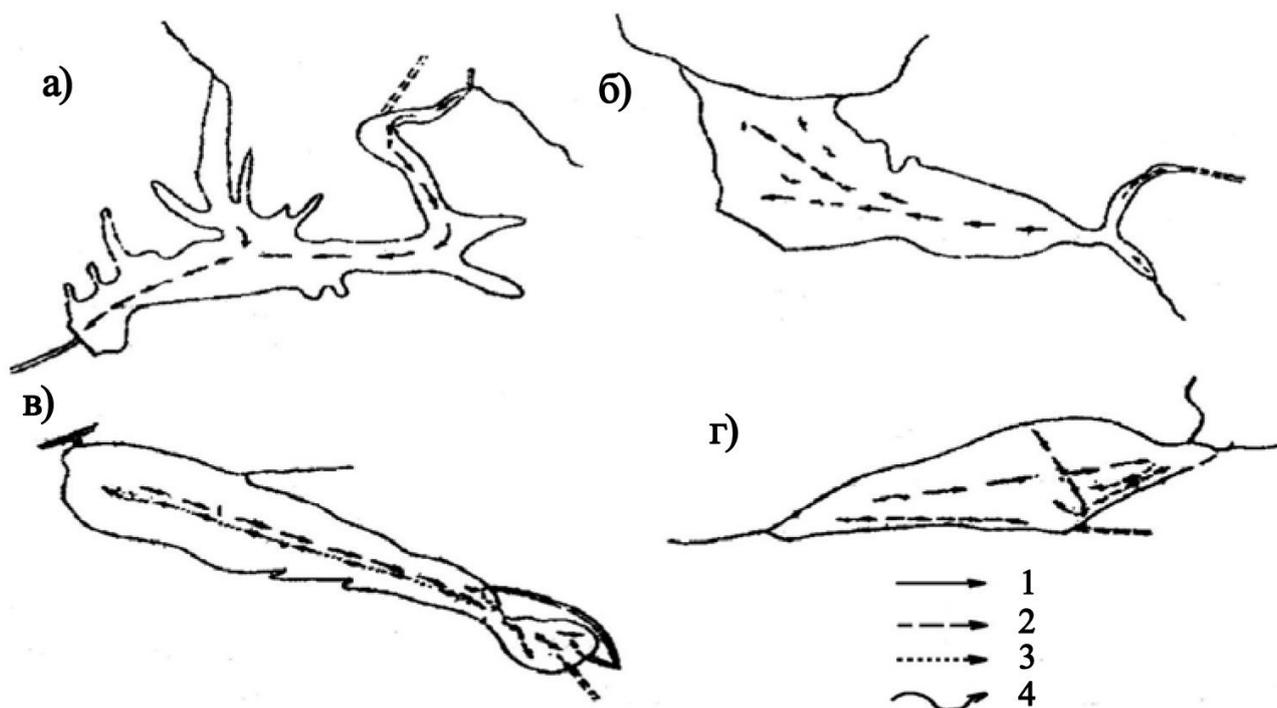


Рис. IV.2.16. Течения на Гальском (а), Шаорском (б), Тбилисском (в) и Храмском (г) водохранилищах.

1 – дрейфовый поток; 2 – горизонтальный поток;
3 – компенсационный поток; 4 – градиентный поток.

Ветровой режим горных районов характеризуется большими колебаниями во времени как по силе, так и по направлению. Скорость и направление ветров изменяются без какой-либо закономерности в пределах от 14 до 40 м/с.

Роза повторяемости ветров вытянута по направлению господствующих ветров и совпадает с длиной водохранилища. Скорость более 20 м/с характерна, в основном, для северо-западных ветров. Максимальные скорости изменяются от 15 до 40 м/с, наибольшая обеспеченность (до 30 %) приходится на ветры в пределах 11-15 м/с; процент безветренной погоды не превышает 10-15%.

По данным натурных исследований в горных водохранилищах наблюдается образование **волн большой высоты** с возможностью быстрой трансформации во времени.

Из-за малых площадей и больших глубин воды **высота волн** изменяется при изменении уровня воды. Например, при понижении уровня воды в Тбилисском водохранилище на 8-10 м высота волн уменьшается на 10-15%. По данным наблюдений изменение высот волн в некоторых водохранилищах достигало 30-40%. Связь между ветром и волновыми течениями более тесная, чем в крупных равнинных водохранилищах. В основном, формируются волны значительной крутизны (до 1/7-1/12), что вызывает резкое и преждевременное обрушение волн.

IV.2.2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВНУТРИВОДОЕМНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Анализ существующих методов расчета элементов волнения в «глубоководье» ($H > \lambda/2$) водохранилищах представлен в виде графического сравнения на рисунке IV.2.17.

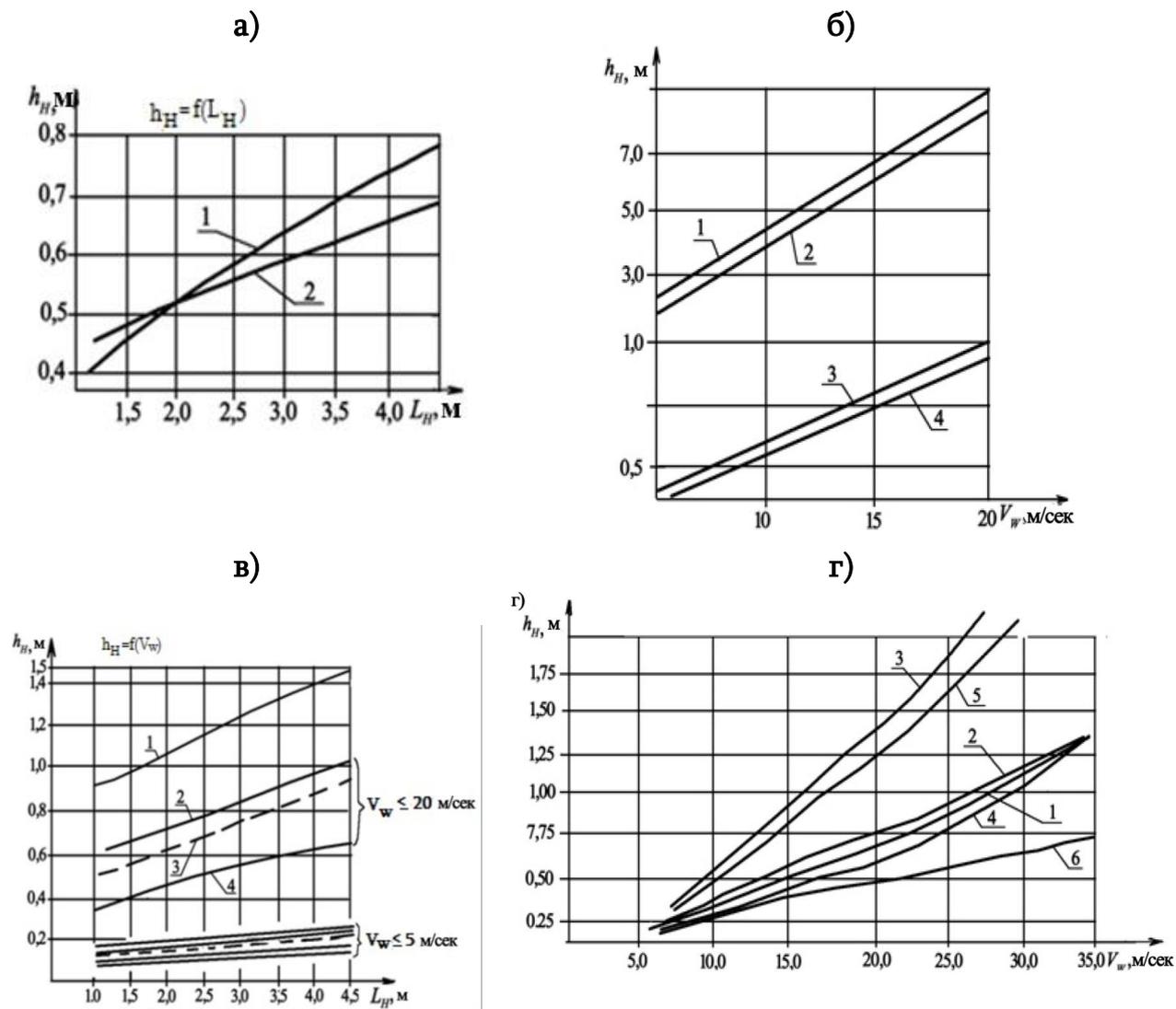


Рис. IV.2.17. Анализ существующих расчетов высоты волн на "глубокой воде" водохранилищ в зависимости от разгона ветра (L_n) и скорости ветра (V_n).

- а) 1 – Марьин В.А., 1939; 2 – Стивенсон; б) 1 – Андрианов В.Г., 1939; 2 – Браславский А.П., 1952; 3 – Никитин И.К., 1959; 4 – Лабзовский Н.А., 1956; в) 1 – Циммерманн; 2 – Берже, 3 – Соловьев; Божич П.К.; 1949; г) 1 – Наблюдения на Тбилисском водохранилище, Варазашвили Н.Г., Иорданишвили И. К., 2004-2010; 2 – Никитин И.К., 1959; 3 – Андрианов В.Г., 1939; 4 – Наблюдения на Цимлянском водохранилище (Россия); 5 – Браславский А.П., 1952; 6 – Лабзовский Н.А., 1956

Факторы, определяющие **ветровой нагон** в «глубоководье» водохранилищ, определялись скоростью ветра (V_n), длиной разгона ветра (L) и глубиной водохранилища (H). При практическом расчете высоты ветрового нагона волны ($h_{set}^{вет}$) достаточно было учесть длину ветрового разгона (L_n) и скорость ветра (V_n) (рис. IV.2.18).

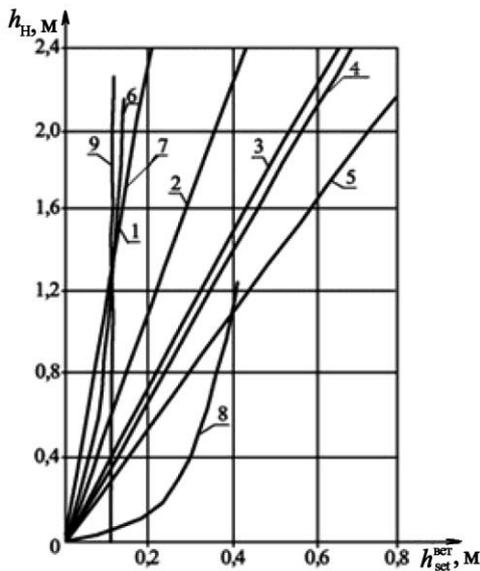


Рис. IV.2.18. Сравнение зависимостей высоты ветрового нагона $h_{set}^{вет}$, вызванного ветром на «глубокой воде» (h_H)
 – На морях: 1 – Деррестейн Р.; 2 – Savill V.T., 1950; 3 – Culling W., 1965; 4 – Hansen A., 1978; 5 – Ionson D.W., 1966;
 – На водохранилищах (Россия): 6 – Караушев А.В., 1977; 7 – СНиП 2.06.04-82; 8 – Лабзовский Н.А., 1956; 9 – Рост Г., *) 6,7,8,9 – при постоянных величинах – $V_w=20$ м/с; $H=10,0$ м, $L=20\ 000$ м.

Значение высоты ветрового нагона $h_{set}^{вет} \geq 0,8$ м характерно для морей и океанов; высота ветрового нагона на водохранилищах равнинного типа $h_{set}^{вет} \leq 0,5$ м; на горных водохранилищах, длина которых $L < 10$ км, высота волнового нагона незначительна – $h_{set}^{вет} \leq 0,001 h_H$ и ее можно не учитывать при практическом расчете.

Величину высоты ($h_{set}^{вол.}$) волнового нагона на горных водохранилищах можно определить по зависимости:

$$h_{set}^{вол.} = 0,1 h_{runup} + \frac{0,5}{m} \text{ м} \quad (IV.2.7)$$

Максимальное значение $h_{set}^{вол.} \leq 0,5 h_{runup}$ ($m = ctg \alpha$ – наклон берега).

Анализ исследований показал, что при расчете высоты волнения на «глубокой воде» не учитывается нерегулярность обеспеченности волнения. Для практических расчетов можно использовать интегральные соотношения, связывающие средние параметры волнения с основными значениями волнообразующих факторов. Увеличение значений обеспеченности высот волн наблюдается в пределах до 2 % и более 95 % (рис. IV.2.19).

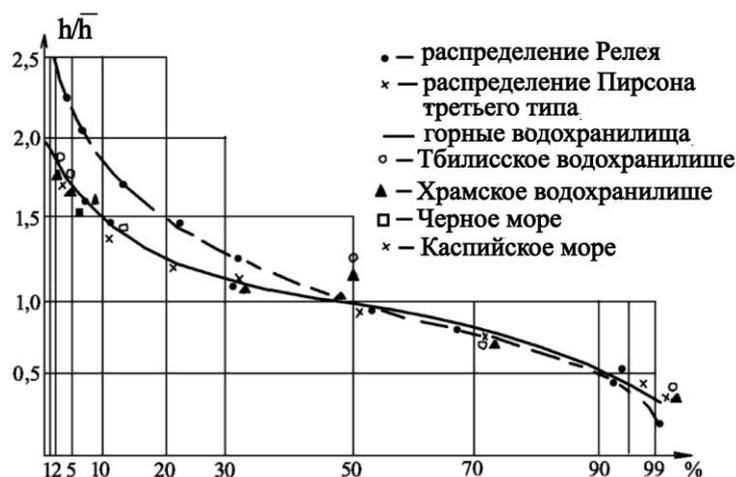


Рис. IV.2.19. Теоретическое распределение Рэля и Пирсона относительных высот волн и их сравнение с данными наблюдений на Черном и Каспийском морях и горных водохранилищах Грузии

Обеспеченность **периода** волнения на горных водохранилищах практически соответствует данным равнинных водохранилищ. Это совпадение наблюдается при сравнении с теоретическими данными распределения (рис. IV.2.20).

Волнообразование на берегах горных водохранилищах осложняется малой длиной разгона ветра и извилистостью береговой линии, что создает локальные ограничения. Такое положение определяет резкое различие параметров волнения – за счет уменьшения экспозиции склона по периметру водохранилища и быстрого заглубления. На ряде водохранилищ разница между высотами волн на разных участках берега достигала 30-40%.

Результаты анализа **трансформации элементов волнения** на мелководье представлены в виде графического сравнения на рисунках IV.2.21; IV.2.22; IV.2.23.

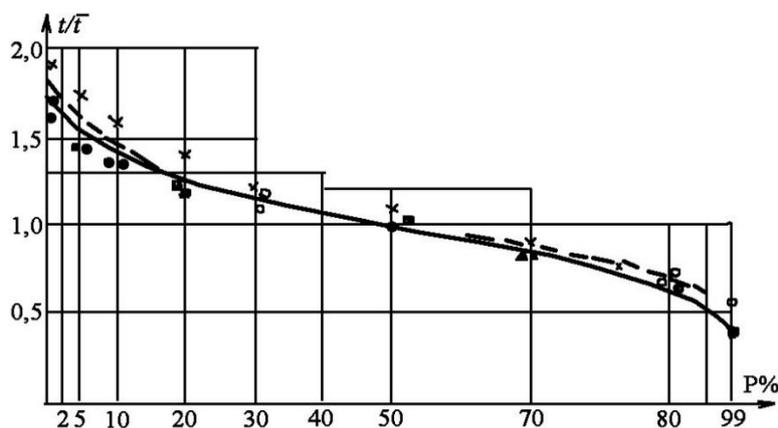


Рис. IV.2.20. Распределение относительных периодов волн

Обозначения: ○ – наблюдения на Каховском водохранилище; ▲ – наблюдения на море (ГОИН); × – наблюдения на море (Корнеева Л.А., 1969); - - - Титов Л.Ф., (1969);
—●— – наблюдения на Тбилисском и Храмском водохранилищах;
■ – Глуховский Б.Х. (1968)

Результаты анализа трансформации крутизны элементов волнения на мелководье представлены в виде графического сравнения на рисунках: IV.2.21; IV.2.22; IV.2.23.

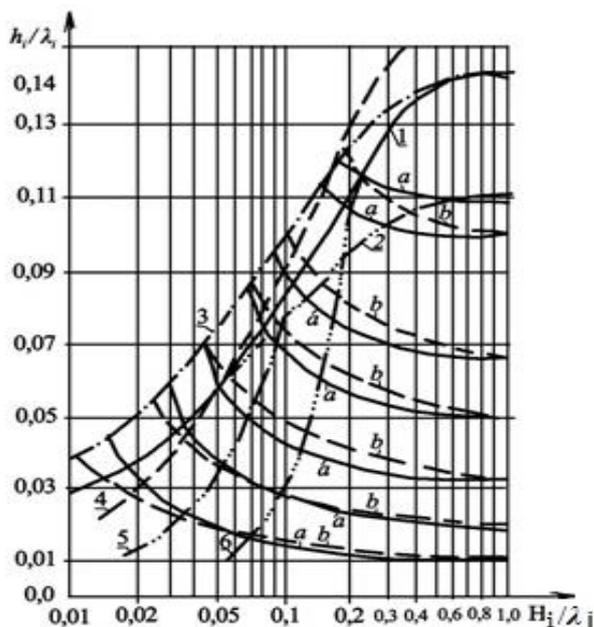


Рис. IV.2.21. Сравнение изменения крутизны (h_i/λ_i) трансформированной волны разных исследователей на глубине ($H_i < H_{cr}$).

a – Miche M., 1954; *b* – Крылов Ю.М., 1962; 1 – Bretschneider C.L., 1960; 2 – по линейной теории, $k=1/9$; 3 – то же, $k=1/7$; 4 – Попов И.Я., 1972; Логинов В.Н., Мунк В., 5 – по теории одиночных волн, 6 – то же – Макс Коуэн.

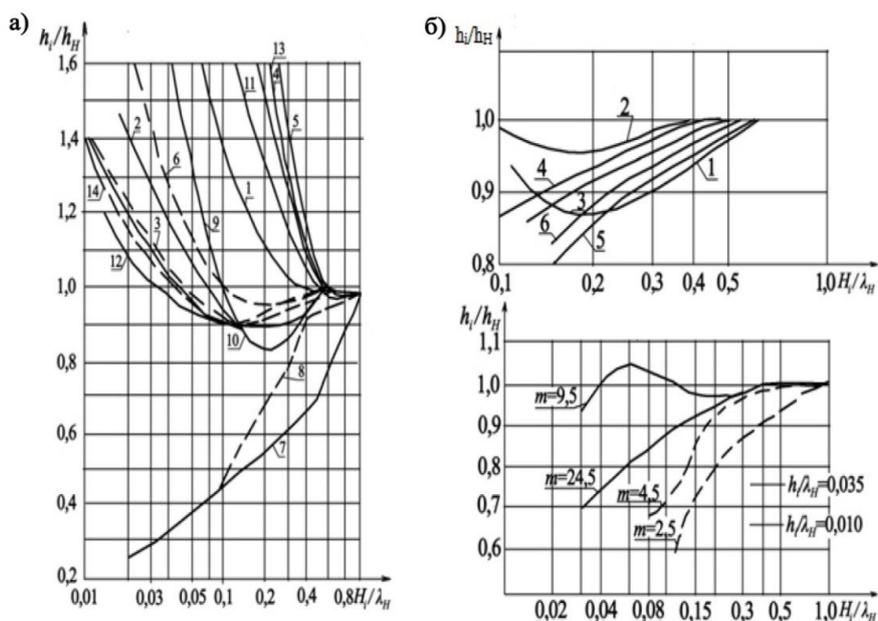


Рис. IV.2.22. Сравнение результатов разных исследователей трансформации высоты волны (h_i) в зоне мелководья

- а) $m=5$, $h_H/\lambda_H=0,06$; 1 – Airy G.B., 1976; 2 – Смирнов А.А., 1960; 3 – Крылов Ю.М., 1948; Miche M.B., 1954; 4 – Шишов И.Д., 1952; Гайяр Д.Д., 1904; 5 – Лонгинов В.Н., 1958; 6 – Stoker G.G., 1847; 7 – Иванов А.А., 1955; 8 – Красножон Г.Ф., 1961; СНИП II - 57-75; Божич П.К., 1949; 9 – Кожевников М.П., 1959; 10 – Андрианов В., 1939; 11 – Иорданишвили И. (на грузинском языке), $m=3,5$; 12 – Иорданишвили И. (на грузинском языке), $m=5,0$ (экспериментальные данные 2004); 13 – Иорданишвили И. (на грузинском языке), $m=3,5$ (теоретические данные 2004); 14 – Иорданишвили И. (на грузинском языке), $m=3,5$ (теоретические данные 2004); б) $m=10\div 30$, 1 – Кожевников М.П., $h_H/\lambda_H=0,10$, 1972; 2 – Кожевников М.П., $h_H/\lambda_H=0,08$, 1972; 3 – СН 92-68, $h_H/\lambda_H=0,10$; 4 – СН 92-68, $h_H/\lambda_H=0,08$; 5 – Гоин $h_H/\lambda_H=0,10$, 1956; 6 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=9,7$, 1956; 7 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=5,7$, 1956.

Результаты расчета критической высоты волн (h_{kr}) в критической зоне приведены в виде графического сравнения (рис. IV.2.23).

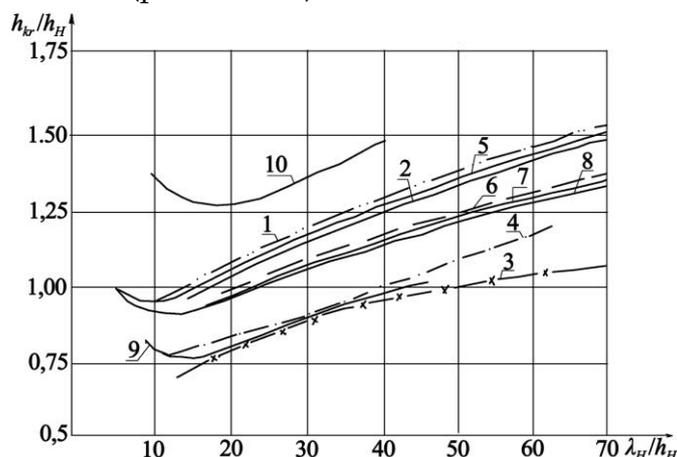


Рис. IV.2.23. Сравнение расчетов разных исследователей критической высоты волны (h_{kr}) в критической зоне

- 1 – Nikamira (Япония), $m=10$, 1985; 2 – Nikamira, $m=20$, 1985; 3 – Nikamira, $m=50$, 1985; 4 – Мунк Н., 1969; 5 – Смирнов А.А., $m=5$, 1983; 6 – Комар; 7 – натурные исследования, США; 8 – Алтуниин Д.Н., $m=10$; 9 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $m=10$, 2004; 10 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $m=2,5$, 2004.

Результаты анализа трансформации **длины волны** в критической зоне представлены в виде графического сравнения на рисунке: IV.2.24.

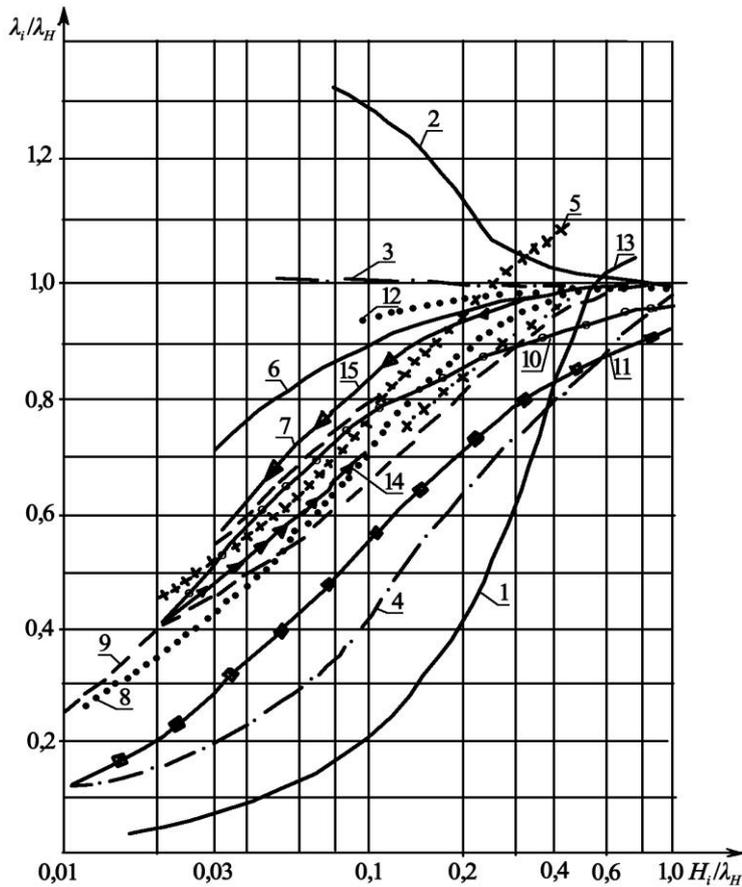


Рис. IV.2.24. Сравнение результатов трансформации длин волн разных исследователей на мелководье
 1 – Крылов Ю.М., 1948; (крутые склоны); 2 – ГОИН ($\lambda_{90\%}$); 3 – ГОИН ($\lambda_{70\%}$); 4 – Лабзовский Н.А., 1956; 5 – Смирнов А.А., 1960; Бретшнейдер К.Л., 1970; 6 – Жуковец А. М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=9,7$, 1959; 7 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=5,7$, 1959; 8 – Miche M.V., 1954; 9 – ГОИН ($\lambda_{1\%}$); 10 – Иванов И.А. М., $m=25$, 1992; 11 – Иванов И. А., $m=120,0$, 1992; 12 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,11$, $m=9,7$, 1956; 13 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,11$, $m=24,5$; 14 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $h_H/\lambda_H=0,053$, $m=20$, 2004; 15 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $h_H/\lambda_H=0,053$, $m=8,0$, 2004

Результаты расчета **глубины (Z) волны** в зоне обрушения приведены в виде графического сравнения (рис. IV.2.25).

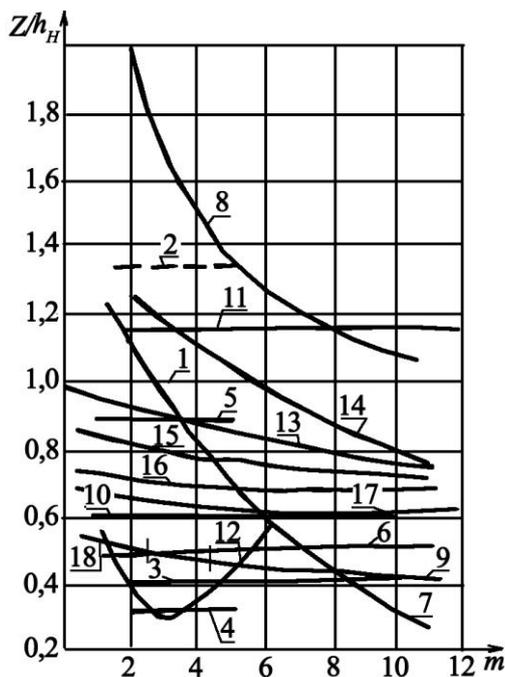


Рис. IV.2.25. Сравнение изменения глубины обрушения (Z) волн разными исследователями
 1 – Божич П.К., Джунковский Н.Н., 1949; Шайтан В.С., 1974; 2 – Miche M.V., 1954; 3 – Шанкин П.А., 1958; 4 – Курлович Е.В., 1957; 5 – Хасхачих Г.Д., 1957; 6 – Пышкин Б.А., 1973; 7 – Салуквадзе Н.И., 1981; 8 – Кульчицкий А.В., 1961; 9 – Юрков Ю.Ю., 1965; 10 – Lupinskiy M.I., 1953; 11 – Смирнов А.А., 1961; 12 – СНИП II 57-75; 13 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $h_H/\lambda_H=17$, 2004-2020; 14 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $h_H/\lambda_H=20$; 2004; 15 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $h_H/\lambda_H=14$, 2004; 16 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $h_H/\lambda_H=13$, 2004; 17 – Иорданишвили И. (на грузинском языке) $h_H/\lambda_H=10$, 2004; 18 – Иорданишвили И. (на грузинском языке), 2004 (с учетом масштабного коэффициента).

Результаты расчета скорости **вскатывания волн** на откос (V_{runup}) представлены в виде графического сравнения (рис. IV.2.26).

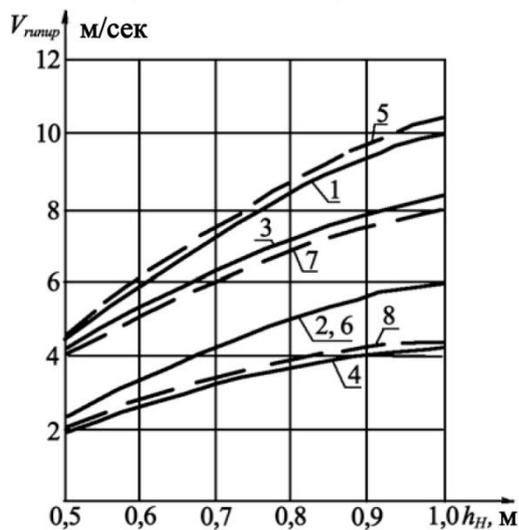
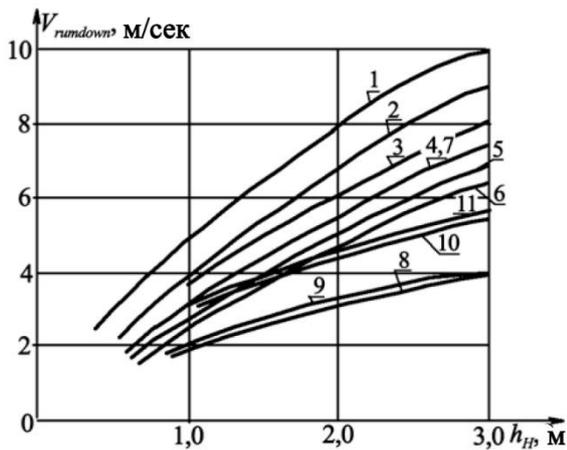


Рис. IV.2.26. Сравнение результатов расчета скорости вскатывания волны (V_{runup}) на склон разными исследователями ($m=3, K=1$)

- 1 – Джунковский Н.Н., 1940, $h_H=3,0$ м, $\lambda_H/h_H=20$; 1940;
- 2- Джужковский Н.Н., $h_H=1,0$ м, $\lambda_H/h_H=20,0$; 1940;
- 3 - Джужковский Н.Н., $h_H=3,0$ м, $\lambda_H/h_H=10$, 1940;
- 4 – Джунковский Н.Н., $h_H=1,0$ м, $\lambda_H/h_H=10$, 1940;
- 5 – Пышкин Б.А., $h_H=3,0$ м, $\lambda_H/h_H=20$, 1979; 6 – Пышкин Б.А., $h_H=1,0$ м, $\lambda_H/h_H=20$, 1979; 7 - Пышкин Б.А., $h_H=3,0$ м, $\lambda_H/h_H=10$, 1979; 8 – Пышкин Б.А., $h_H=1,0$ м, $\lambda_H/h_H=10$, 1979

Результаты расчета скорости волн, скатывающихся со склона ($V_{run down}$), показаны на рисунке IV.2.27.



Бэб. IV.2.27. Сравнение результатов расчета скорости скатывания волн со склона ($V_{run down}$) разными исследователями на глубине $H=h_H/2$, K - шероховатость склона; 1÷6 – Шайтан В.С., $K=0,5$; 7 – Н. Салуквадзе (на грузинском языке), $K=0,96, m=3,0, \lambda_H/h_H=20$; 8 – И. Иорданишвили (на грузинском языке), $K=0,5, \lambda_H/h_H=10$; 9 – И. Иорданишвили (на грузинском языке), $K=0,5, \lambda_H/h_H=20$, 10 – И. Иорданишвили (на грузинском языке), $K=1,0, \lambda_H/h_H=10$, 11 – И. Иорданишвили (на грузинском языке), $K=1,0, \lambda_H/h_H=20$, 2004

При анализе различных методов расчета параметров волнения в зоне обрушения водохранилища были выявлены существенные различия и противоречия в их результатах. Разные теории волн привели к различиям и ограничениям при назначении границ расчета (рис. IV.2.28).

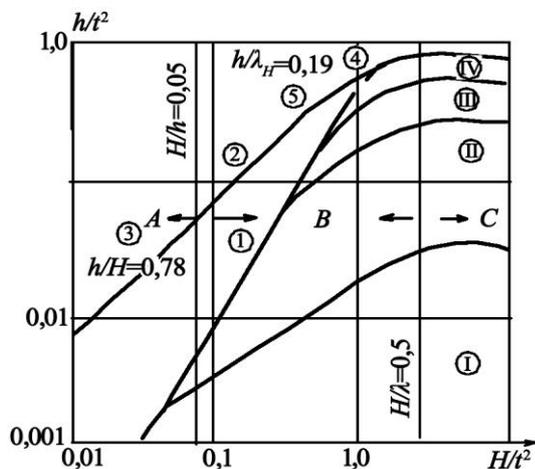


Рис. IV.2.28. Пределы применения волновых теорий

- A - волны в зоне мелководья; Б - волны на средней глубине; С - волны на «глубокой воде»; I – линейная теория (Ери); II – вторая приближенная теория (Стокс), III – третья приближенная теория (Стокс), IV – четвертая приближенная теория (Стокс), 1 – кноидальная теория волн; 2 – волны в зоне обрушения; 3 – одиночная волна, 4 – одиночная волна на «глубокой воде»; 5 – формула Mich.

Шероховатость и пористость откоса являются одними из важных факторов, влияющих на изменение волновых элементов на мелководье.

В зоне трансформации крутой склон способствует увеличению крутизны и высоты волн, а также снижению его устойчивости.

В зоне обрушения волна может полностью погаснуть и принять форму скользящего потока. Элементы шероховатости оказывают «тормозящее» действие на накатывающий поток, вызывая уменьшение скорости вскатывания волн на откос и высоты волн, при этом волновой нагон максимален.

В этой зоне влияние шероховатости оценивается коэффициентом шероховатости (отношением высоты волны на шероховатом и гладком склоне) $-K_r = \frac{(h_{run\ up})_{шер.}}{(h_{run\ up})_{глад}}$.

Таким образом, при прогнозировании элементов волнения на разных участках горных водохранилищ следует учитывать множество факторов.

Прогноз волновых процессов на «глубоководье» горных водохранилищ

На основе анализа натуральных наблюдений, проведенных на «глубоководье» горных водохранилищ Грузии, предложена расчетная зависимость **средней высоты волны** (\bar{h}_H):

$$\bar{h}_H = A_W \cdot V_W^{1.2} \cdot L^{0.4}, \quad (IV.2.8)$$

где $A_W = (0,022 \div 0,016)a_p$; a_p – коэффициент, зависящий от горности водохранилища; V_W и L – скорость ветра (м/с) и длина разгона ветровой волны (км); значения a_p и A_W приведены в табл. IV.2.7.

Таблица IV.2.7

Значения коэффициентов a_p и A_W

a_p	0,78	0,51	0,37	0,27	0,16
A_W	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018

Высота и длина элементов волны $n\%$ -ой обеспеченности определяются путем умножения среднего значения характерного волнового элемента на коэффициент (K_n) (табл. IV.2.8).

Период волны (t) на «глубокой воде» определен на основании натуральных наблюдений:

$$t = 4,08h_H^{0.59} \quad (IV.2.9)$$

Средняя длина волны ($\bar{\lambda}_H$) рассчитывается по формуле:

$$\bar{\lambda}_H = \frac{0,42t^2}{2\pi} . \quad (IV.2.10)$$

Значения коэффициентов (k) при расчете элементов волн $n\%$ -ой обеспеченности

Соотношения элементов волн	Значения коэффициентов элементов волн для обеспеченности ($n\%$)									Примечание
	1%	2%	5%	10%	20%	30%	50%	70%	95%	
$\lambda_i/\bar{\lambda}_H$	1,82	1,69	1,61	1,50	1,32	1,13	0,98	0,70	0,41	–
t_i/\bar{t}_H	1,64	1,59	1,49	1,38	1,22	1,10	0,96	0,82	0,38	–
h_i/h_H (на глубине $h_H/H = 0,05$)	2,12	1,97	1,88	1,77	1,48	1,23	0,95	0,61	0,23	максимум
–	1,59	1,48	1,43	1,35	1,25	1,13	0,97	0,71	0,45	минимум
–	1,79	1,68	1,57	1,47	1,31	1,18	0,96	0,81	0,38	средний
h_i/h_H (на глубине $h_H/H = 0,25$)	2,01	1,87	1,71	1,55	1,36	1,21	0,98	0,71	0,40	максимум
h_i/h_H (на глубине $h_H/H = 0,50$)	1,63	1,51	1,46	1,37	1,25	1,16	1,01	0,86	0,63	максимум

Прогноз волновых процессов в зоне трансформации берегов водохранилища

Относительная высота волны (h_i/h_H) n -ой обеспеченности в зоне трансформации определяется по зависимости:

$$h_i/h_H = K \cdot K_{шер} K_n \cdot f(m, H_i/\lambda_H, h_H/\lambda_H), \quad (IV.2.11)$$

где - $K = 0,7 \div 0,8$; $K_{шер}$ – коэффициент шероховатости поверхности откоса; K_n – коэффициент обеспеченности волнового режима, значения которого $K_n^{0.1\%} = 0,89$, $K_n^{1.0\%} = 0,71$, $K_n^{2\%} = 0,69$, $K_n^{5\%} = 0,63$, $K_n^{10\%} = 0,59$, $K_n^{30\%} = 0,52$, $K_n^{70\%} = 0,39$; $f(m, H_i/\lambda_H, h_H/\lambda_H)$ – значения рассчитываются с помощью номограмм или расчетных формул (табл. IV.2.9) [Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2010 (на грузинском языке)].

Таблица IV.2.9

Расчетная формула относительной высоты трансформирования волны (h_i/h_H) на склоне

K	m	H/λ_H	h_H/λ_H	h_i/h_H
1	2	3	4	5
0,8	9,51÷6,31	0,05÷0,21	0,03÷0,05	$K \cdot K_{шер} \cdot K_n \cdot f_1\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
0,8	6,30÷3,08	0,05÷0,20	0,03÷0,05	$K \cdot K_{шер} \cdot K_n \cdot f_2\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
0,7	9,5÷0,9	0,03÷0,10	0,03÷0,05	$K \cdot K_{шер} \cdot K_n \cdot f_3\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
0,7	3,1÷0,9	0,02÷0,1	0,06÷0,1	$K \cdot K_{шер} \cdot K_n \cdot f_4\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$

Длина (λ) и период (t) волн в зоне трансформации на горных водохранилищах изменяются незначительно, поэтому:

$$\lambda_i = \lambda_H, \quad t_i = t_H \quad (\text{IV.2.12})$$

**Прогноз волновых процессов в «критической» зоне
откосов горных водохранилищ**

Относительная **критическая глубина** воды (H_{cr}/λ_H) в зоне обрушения волн определяется соотношением:

$$H_{cr}/\lambda_H = K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f(m) \cdot f(h_H/\lambda_H), \quad (\text{IV.2.13})$$

где $K = 2,9 \div 7,0$, значения приведены в таблице IV.2.10; $a_r = 1,5$ – масштабный коэффициент; $K_{шер}$ – коэффициент шероховатости поверхности откоса; значения $f(m) \cdot f(h_H/\lambda_H)$ рассчитываются с помощью номограмм или расчетных формул (табл. IV.2.10).

Таблица IV.2.10

Расчетные зависимости критической глубины (H_{cr}/λ_H) волны

K	m	h_H/λ_H	H_{cr}/λ_H
7,0	9,51÷1,5	0,03÷0,055	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_1\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
7,0	6,30÷3,08	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_2\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
3,0	3,07÷1,54	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_3\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
2,9	9,51÷6,21	0,06÷0,1	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_4\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$

Значения **относительной критической высоты** волны (h_{cr}/h_H) в критической зоне определяется соотношением:

$$\frac{h_{cr}}{h_H} = K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right), \quad (\text{IV.2.14})$$

где значения K приведены в таблице IV.2.11; $a_r = 1,5$ – масштабный коэффициент; $K_{шер}$ – коэффициент шероховатости откоса; $f(m) \cdot f(h_H/\lambda_H)$ – рассчитывается по номограммам или расчетным формулам (табл. IV.2.11).

Таблица IV.2.11

**Значения критической высоты трансформированной
волны на берегу (h_{cr}/h_H)**

K	m	h_H/λ_H	h_{cr}/h_H
1,8	9,5÷6,31	0,03÷0,055	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_1\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
1,9	6,30÷3,08	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_2\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
1,1	3,10÷1,540	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_3\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
1,3	9,5÷1,54	0,06÷0,	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_4\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$

Прогноз волновых процессов в зоне обрушения волн

Относительная глубина **обрушения** волн $\frac{Z}{h_H}$ на берегу рассчитывается по формуле:

$$\frac{Z}{h_H} = K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right), \quad (IV.2.15)$$

где значения (K) приведены в таблице IV.2.12; $a_r = 1,5$ – масштабный коэффициент; $K_{шер}$ – коэффициент шероховатости откоса; $f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$ – рассчитываются по номограммам или расчетным формулам (табл. IV.2.12).

Таблица IV.2.12

Критическая глубина (Z/h_H) трансформированной волны на берегу

K	m	h_H/λ_H	Z/h_H
1,0	3,00÷6,31	0,03÷0,055	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_1\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
1,2	3,0÷0,9	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_2\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
1,1	6,31÷9,5	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_3\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
1,2	9,5÷0,9	0,05÷0,1	$K \cdot a_r \cdot K_{шер} \cdot f_4\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$

Прогноз волновых процессов в зоне наката волн на откос

Относительная высота **наката** волн $\left(\frac{h_{runup}}{h_H}\right)$ на откос рассчитывается по формуле:

$$h_{runup}/h_H = K \cdot K_{шер} \cdot K_{скв} \cdot f(m) \cdot f(h_H/\lambda_H). \quad (IV.2.16)$$

где $K_{шер}$ – коэффициент шероховатости откоса; $K_{скв}$ – коэффициент сквозности откоса; $f(m) \cdot f(h_H/\lambda_H)$ – рассчитывается по номограммам или расчетным формулам (табл. IV.2.13); значения K приведены в таблице IV.2.13.

Таблица IV.2.13

Высота (h_{runup}/h_H) наката волн на откос

K	m	h_H/λ_H	h_{runup}/h_H
1,0	9,51÷6,31	0,02÷0,06	$K \cdot K_{шер} \cdot K_{скв} \cdot f_1\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
0,5	6,30÷3,08	0,02÷0,06	$K \cdot K_{шер} \cdot K_{скв} \cdot f_2\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
0,4	3,07÷0,90	0,03÷0,06	$K \cdot K_{шер} \cdot K_{скв} \cdot f_3\left(m, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$

Скорость **вскатывания волны на откос** (V_{runup}) рассчитывается по формуле:

$$V_{runup} = K \cdot f(H) \cdot f(K_{шер}) \cdot f(h_H) \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right), \quad (IV.2.17)$$

Где $K \cdot f(H) \cdot f(K_{шер}) \cdot f(h_H) \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)$ – рассчитывается по формулам, приведенным в таблице IV.2.14; значения (K) приведены в той же таблице; $K_{шер}$ – коэффициент шероховатости откоса.

Формулы для расчета скорости волн, вскатывающихся на склон (V_{runup})

K	m	$K \cdot f(H) \cdot f(K_{шер}) \cdot f(h_H) \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)$
1	2	3
4,33	9,5÷6,1	Выше спокойного уровня: $\left(0,3 - \frac{L_i}{\sqrt{1-m^2}}\right) \cdot [-0,24 + 3,11K_{шер} - 1,67K_{шер}^2] \cdot [0,5 + 3,5h_H - 4,36h_H^2] \times$ $\times [12,57 - 222,48(1/m) + 1068,18(1/m)^2] \cdot [-1,50 + 0,35\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right) - 0,01 \cdot \left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)^2]$
0,58	9,5÷6,1	Ниже спокойного уровня: $[1,3 + 10,8z_i] \cdot [-0,24 + 3,11K_{шер} - 1,67K_{шер}^2] \cdot [0,5 + 3,5h_H - 4,36h_H^2] \times$ $\times [12,57 - 222,48(1/m) + 1068,18(1/m)^2] \cdot [-1,50 + 0,35\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right) - 0,01 \cdot \left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)^2]$
0,76	6,15÷3,1	Выше спокойного уровня: $1,67\left(0,6 - \frac{L_i}{\sqrt{1-m^2}}\right) \cdot [0,50 + 1,70K_{шер} - K_{шер}^2] \cdot [1,1 + 1,25h_H - 1,25h_H^2] \times$ $\times [0,9 + 8,78(1/m) - 15,69(1/m)^2] \cdot [0,65 + 0,28\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right) - 0,01 \cdot \left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)^2]$
0,76	6,15÷3,1	Выше спокойного уровня: $[1,0 + z_i] \cdot [0,5 + 1,70K_{шер} - K_{шер}^2] \cdot [1,1 + 1,25h_H - 1,25h_H^2] \times$ $\times [0,9 + 8,78(1/m) - 15,69(1/m)^2] \cdot [-0,65 + 0,28\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right) - 0,01 \cdot \left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)^2]$
0,85	3,0÷0,9	Выше спокойного уровня: $0,92\left(1,2 - \frac{L_i}{\sqrt{1-m^2}}\right) \cdot [0,52 + 1,71K_{шер} - 0,97K_{шер}^2] \cdot [0,84 + 1,75h_H - 1,87h_H^2] \times$ $\times [0,88 + 0,90(1/m) - 0,54(1/m)^2] \cdot [0,86 + 0,04\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right) - 0,01\left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)^2]$
0,85	3,0÷0,9	Ниже спокойного уровня: $[1,1 + 3,0z_i] \cdot [0,52 + 1,71K_{шер} - 0,97K_{шер}^2] \cdot [0,84 + 1,75h_H - 1,87h_H^2] \times$ $\times [0,88 + 0,90(1/m) - 0,54(1/m)^2]$

Скорость **скатывания волн** со склона ($V_{rundown}$) рассчитывается по формуле:

$$V_{rundown} = V_{runup}/1,3 \quad (IV.2.18)$$

Сводные данные изменения волновых элементов на откосе приведены в таблице

IV.2.15.

Таблица IV.2.15

Расчетные формулы волновых элементов

Расчетная зона	Формулы расчета
1	2
Зона трансформации	$h_i/h_H = K \cdot K_{шер} K_n \cdot f\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right) \lambda_i = \lambda_H, t_i = t_H$
Критическая зона	$\frac{h_{cr}}{h_H} = K \cdot K_{шер} \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$ $H_{cr}/\lambda_H = K \cdot K_{шер} \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
Зона обрушения	$\frac{Z}{h_z} = K \cdot K_{шер} \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
Зона наката	$h_{runup}/h_H = K \cdot K_{шер} \cdot K_{скв} \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$ $V_{rundown} = V_{runup}/1,3$

Пересчет **трехмерной высоты волны** $P\%$ -ой обеспеченности на «глубокой воде» в двумерную проводится для соответствующих коэффициентов K_b и K_l (табл. IV.2.16).

Таблица IV.2.16

Значения коэффициентов K_b и K_l

Обеспеченность, $P\%$	0,1	1	2	5	10	20	30	40	50	70
K_b	0,83	0,71	0,69	0,63	0,59	0,53	0,52	0,48	0,43	0,39
K_l	1,04	0,88	0,84	0,76	0,71	0,60	0,58	0,54	0,49	0,40

Распределение волн в зоне трансформации имеет вид:

$$F\left(\frac{h_i}{h_H}\right) = \exp\left[-\frac{\pi}{1 + 4\left(\frac{1+h_h}{\sqrt{2\pi}}\right)}\left(\frac{h_i}{h}\right)^{\frac{2}{1-h_x}}\right], \quad (IV.2.19)$$

где $h_x = h/H$.

В зоне обрушения волны ($H = 2h$) **распределение волн имеет вид:**

$$F\left(\frac{h_i}{h_H}\right) = \exp\left[\frac{\pi}{4.8}\left(\frac{h_i}{h_H}\right) 4\right] \quad (IV.2.20)$$

V. СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ДНЕ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

V.1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДНЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

Методика определения седиментационных процессов на дне водохранилищ равнинного типа представлена общей зависимостью [Караушев А.В., 1977]:

$$t_{усл.} = (V_{полн.} - W_p) / V_{н.ср.} \text{ (годы)}, \quad (V.I.1)$$

где $t_{усл.}$ – условный период полного заполнения водохранилища наносами (лет); $V_{полн.}$ – полный объем водохранилища при НПУ, м³; W_p – объем русла реки; $V_{н.ср.}$ – условный среднегодовой сток наносов, м³/год. Если $W_p \ll V_{полн.}$, то:

$$t_{усл.} = V_{полн.} / V_{н.ср.} \text{ (лет)} \quad (V.I.2)$$

Если $t_{усл.} < 200$ лет, то расчет периода заполнения наносами водохранилища ведется с учетом сброса наносов в нижний бьеф, и рекомендуется вести **по двум** стадиям осадконакопления. Период условной первой стадии седиментации $t_{усл.1}$ определяется зависимостью:

$$t_{усл.1} = (V_{полн.} - 8,33W_{рус}) / V_{н.ср.}, \text{ лет}, \quad (V.I.3)$$

где $W_p = L \cdot \omega_p$, L – длина водохранилища, ω_p – площадь поперечного сечения русла. На первом этапе **объем наносов** рассчитывается по формуле:

$$\overline{V_{H1}} = V_{н.ср.} \cdot t_{H1} \text{ м}^3, \quad (V.I.4)$$

где $V_{н.ср.}$ – среднегодовое количество осадков, t_{H1} – период **первой стадии** осадконакопления.

При переходе от первой стадии осадконакопления водохранилища **ко второй стадии** осадконакопления расчет ведется по зависимости Г.И. Шамова [Шамов Г.И., 1969].

Прогнозирование процессов седиментации затруднено значительным несоответствием твердого и жидкого наносов, изменчивостью их гранулометрического состава, значительными колебаниями уровня воды водохранилищ, активизацией приливно-отливных течений, абразионной переработкой берегов и другими процессами [Patriadia A., Soemitro R., Warnana D., 2021; Li D., Lux., Overeem I. и др., 2021.; Ran L., Lu X., Xinz., Yang X., 2013; Copinath A., и др., 2014; Mansikkamaki H., 2013; Hosseinjanzadeh. H. и др., 2015; Andredaki M., и др., 2014; Bennett S., и др., 2013; Хмаладзе Г.Н., 1978; Гвелесиани Л.Г., Шмальцель И.П., 1988; 2014; Метревели Г.С., 1973; Петров Т.Н., 2008; Сванидзе Г., 1988; Скрыльников В.А., 1988; Мамедов А.Ш., Мамедли А.А., 2016; Хаширова Т.Ю., 2007] .

По исследованиям, проведенным на горных водохранилищах России, США, Узбекистана и Грузии, степень «мутности» водохранилища можно разделить на две стадии – I и II (рис. V.1.1).

* Термин степень «мутности» по нашему мнению больше соответствует рассматриваемому процессу, чем термин «осветление», который принят рядом исследователей.

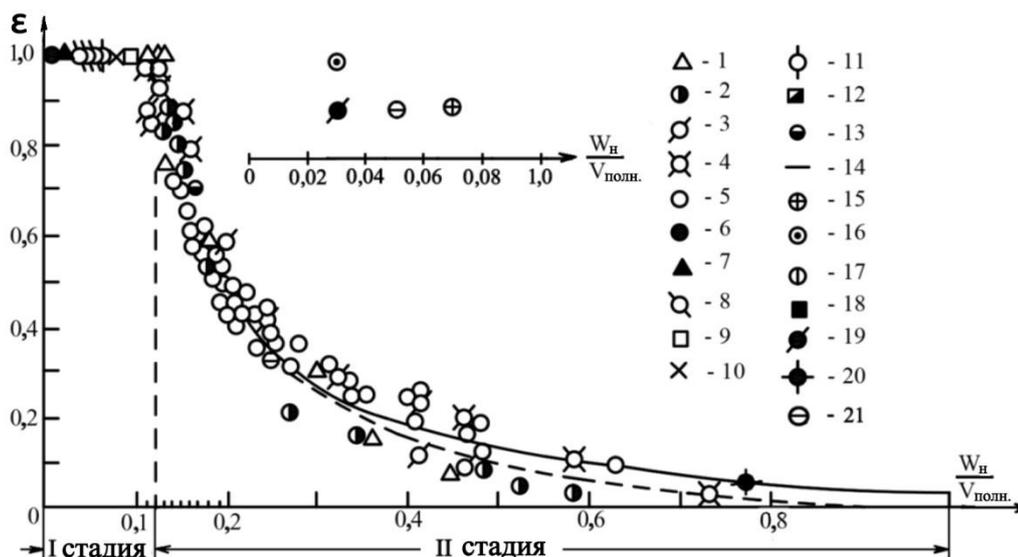


Рис. V.1.1. График анализа процесса осадконакопления водохранилищ
 1 – бьеф Фархади, 1949 г.; 2 – то же, 1951 г.; 3 – то же, 1952 г.; 4 – бьеф Хиш-Рау, 1958 год;
 5 – лабораторные данные; 6 – Каракумское водохранилище; 7 – Ташкерпинское водохранилище (1939-1961 гг.); 8 – Тедженский гидроузел (1950-1959 гг.); 9 – Боз-Суйский бьеф; 10 – лабораторный бьеф №1; 11 – водохранилище Остин (США); 12 – Бойсен (США); 13 – бьеф Уч-Курганской ГЭС; 14 – формула (V.1.4); 15 – Сионское водохранилище (2022 г.); 16 – Тбилисское водохранилище, 2022 г.; 17 – Жинвальское водохранилище (2022 г.); 18 – Храмское водохранилище (2022 г.); 19 – Шаорское водохранилище (2022 г.); 20 – Ладжанурское водохранилище (2022 г.); 21 – Ткибульское водохранилище (2022 г.)

На **первой стадии** степень осадконакопления («мутности») остается постоянной и равна 1 ($\varepsilon = W_{расч.}/W_H = 1$).

На **второй стадии** - показатель «мутности» $W_H/V_{полн.}$ снижается с 1 до 0. Если не учитывать промыв с верхнего бьефа, то на первом этапе происходит полное накопление наносов, т.е. $\varepsilon = 1$. При переходе во вторую стадию осадок начинает переходить в нижний бьеф. Показателем перехода от первой стадии седиментации ко второй является зависимость (рис. V.1.1):

$$W_H/V_{полн.} \leq 0,12, \quad (V.1.5)$$

или

$$V_{полн.} \geq 8,22W_H \quad (V.1.6)$$

Тогда период осадконакопления водохранилища на первом этапе составит:

$$t = V_{полн.}/Q_H \quad (V.1.7)$$

где Q_H – среднегодовая скорость накопления наносов.

На **второй (критической) стадии** осадконакопления водохранилища показатель «мутности» (ε) можно определить по формуле:

$$\varepsilon = 0,041 \left(W_{расч.}/W_H \right)^{-1,5}, \quad (V.1.8)$$

который представлен сплошной линией на рис. V.1.1.

Период седиментации второй стадии (t'') составит:

$$t'' = \frac{48,8W_H^{1,5}}{Q_H} \left(\frac{1}{\sqrt{W_H' - W_H''}} - \frac{1}{\sqrt{W_H'}} \right) \quad (V.1.9)$$

Соответственно, объем осаднения будет:

$$W_H'' = W_H' - \frac{1}{\left(\frac{tQ_H}{48,8W_{расч.}^{1,5}} + \frac{1}{W_H'} \right)} \quad (V.1.10)$$

Процесс осадконакопления горного водохранилища можно разделить на три этапа:

- на **первом этапе** наблюдается монотонное оседание наносов;
- на **втором этапе** интенсивность процесса седиментации снижается, так как часть наносов сбрасывается в нижний бьеф;
- на **третьем этапе** осадок полностью сбрасывается в нижний бьеф и процесс становится стабильным.

По распределению осадков на дне горных водохранилищ выделяют **три зоны** [Варазашвили Н.Г., 2001; Варазашвили Н.Г., Тевзадзе Т.В., 1999; Воропаев Г.В., Авакян А.Б., 1986; Iordanishvili I.K., Iordanishvili K.T., Iremashvili I. R., 2009; И. Иорданишвили, К. Иорданишвили, З. Чарбадзе, Л. Джавахишвили (на грузинском языке) 2011; Iordanishvili K., Qigely B., Matcharadze S., 2014] (рис. V.I.2).

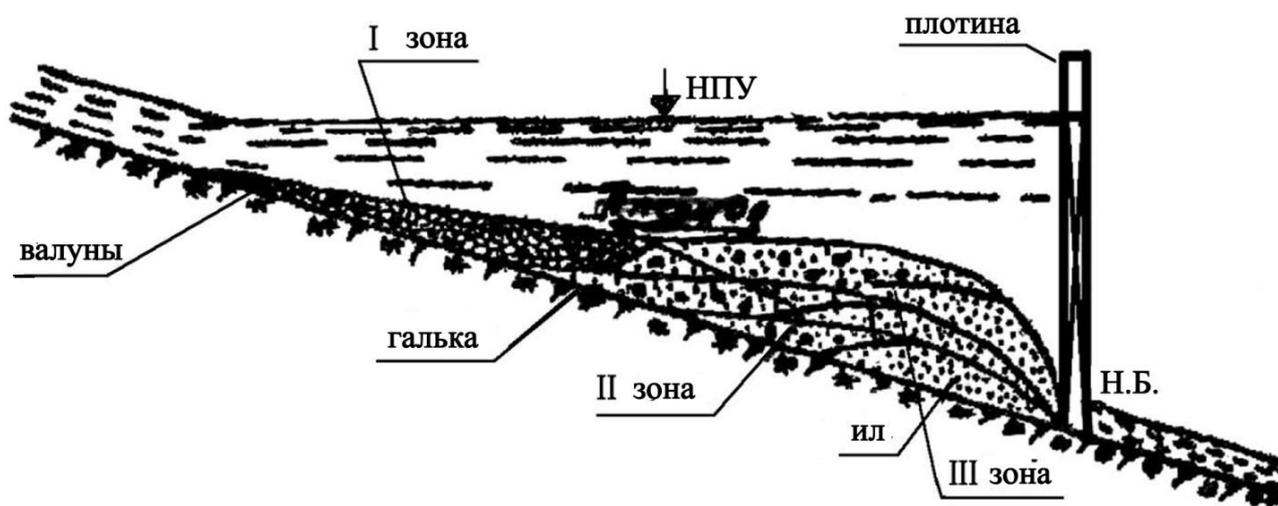


Рис. V.I.2. Схема накопления наносов на дне горных водохранилищ

I – в верхней части водохранилища, где озерный режим периодически меняется русловым, а – наносы разной фракции; II – в средней части водохранилища одновременно формируются две призмы осадконакопления: одна – из мелких донных отложений и другая – из крупных донных отложений; III – в приплотинной зоне основная масса наносов скапливается в примыкающей к плотине части

Как видим, существующие методы прогнозирования процессов седиментации несовершенны. В следующей главе представлены результаты исследований масштабов, динамики и прогнозирования процессов осадконакопления в ряде горных водохранилищ Грузии.

V.2. ДИНАМИКА И ПРОГНОЗ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДНЕ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ ГРУЗИИ

Глобальные изменения климата привели к активизации седиментационных процессов в водохранилищах Грузии [И. Иорданишвили, И. Иремашвили, Д. Поцхверия, Н. Канделаки, Л. Биланишвили, 2017 (на грузинском языке)].

Основные результаты изучения динамики и прогнозирования процессов седиментации на дне ряда водохранилищ Грузии (Жинвальское, Сионское, Тбилисское, Храмское Шаорское, Ладжанурское и Ткибульское) представлены в работах [Уйма А., Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Варганов М.В., Канделаки Н.В., Иорданишвили К.Т., 2019; Kandelaki N., Iordanishvili I., Yjma A., Iremashvili I., Iordanishvili K., Kupreishvili Sh., Shurgaia V., Natroshvili G., 2019; Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Канделаки Н.В., 2012; Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В., 2016; [Н. Канделаки, А. Силагадзе, 2017; Н. Канделаки, 2019 (на грузинском языке)].

Жинвальское водохранилище

Краткое описание Жинвальской водохранилищной системы

Жинвальское водохранилище ($V_{полн.} = 510,0$ млн m^3 , $V_{мерт.} = 150$ млн m^3) расположено в районе слияния рек – Мтиулетис-Арагви, Пшавис-Арагви и Хорхе. Водоохранилище сезонного регулирования и используется для гидроэлектроэнергии, питьевого водоснабжения и орошения. Вода забирается из буферного бассейна объемом 1 млн m^3 , расположенного на водоотводном тракте ГЭС. Часть воды (12,0 m^3/c) поступает в Тбилисское водохранилище и используется для орошения, а часть (5,2 m^3/c) используется для питьевого водоснабжения г. Тбилиси (рис. III.2.2; V.2.1).

Дно водохранилища сложено древнейшими меловыми породами Мезозоя и Кайнозойских отложений. Новообразования вплоть до Четвертичного возраста представляют собой конгломераты. На склонах преобладают породы флишевой фации со сланцеватыми мергелями, известняками, глинистыми сланцами и аргиллитами. Четвертичные породы представлены аллювиями поймы реки Арагви и слоями пролювиально-делювиальных отложений.

Водоохранилище находится в тектонической зоне, тектоника правого борта долины относительно спокойная. Водоохранилище руслового типа, вытянутое по долинам двух рек. Максимальная длина 12,0 км, максимальная ширина 1,0 км, средняя – 0,70 км. Основное гидросооружение представлено насыпной каменной плотиной высотой 102,0 м и длиной 415,0 м, башенным водозабором, сбросом на левом берегу (100 m^3/c) и глубинным водосбросом со сбросом (1000 m^3/c). От водозабора вода поступает к турбинам по подземному тоннелю длиной 625,0 м. В подземном зале ГЭС находятся 4 гидроагрегата мощностью по 232,5 тыс кВт, общая длина деривации 9,7 км и безнапорный тоннель, соединяющийся с каналом, каждый сбрасывает воду в буферный бассейн (Бодорна).

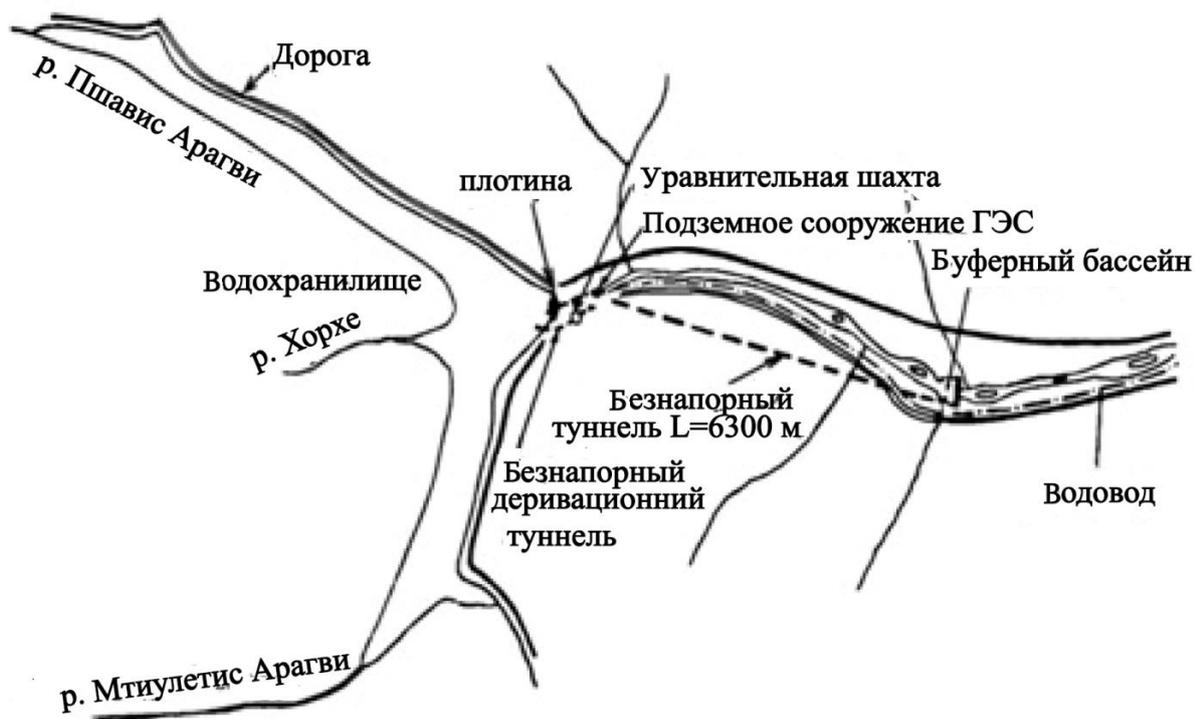


Рис. V.2.1. Схема Жинвальского водохранилища

Уровенный режим водохранилища нестабилен. Максимальная глубина водохранилища составляет 94,0 м, средняя – 50,0 м, амплитуда колебаний уровня воды – 40,0 м.

Ветро-волновой режим развит в расширенной части водохранилища и характеризуется неравномерностью. Наиболее сильное волнение наблюдается в долинной части водохранилища.

Седиментационные процессы на дне Жинвальского водохранилища

Количество наносов, накопившихся на дне **Жинвальского водохранилища**, определяли путем сопоставления с топографическими картами дна водохранилища, снятыми до заполнения водохранилища (1985 г.) (рис. V.2.2). По изменению объема наносов можно наблюдать следующие закономерности: высота слоя наносов наибольшая в районе плотины. Высота слоя здесь до 30,0 метров. Наиболее интенсивно процесс седиментации протекает в водохранилище между отметками $\nabla 740-765$ м, длина которого составляет 2000÷2200 м. После впадения в водохранилище, скорость воды реки уменьшается из-за увеличения глубины воды и живого сечения потока, что приводит к осаждению сначала крупных фракций, а затем более мелких частиц. Этот процесс происходит ниже отметки $\nabla 770$ м.

В результате полевых исследований, проведенных в 2012-2022 гг., были определены геодезические точки в системе координат, а по батиметрическим картам обозначены основные сечения – I, II, III и IV. Профили сравнивались с результатами полевых исследований, проведенных "Гидросферой" в 2010 г. (рис. V.2.3).

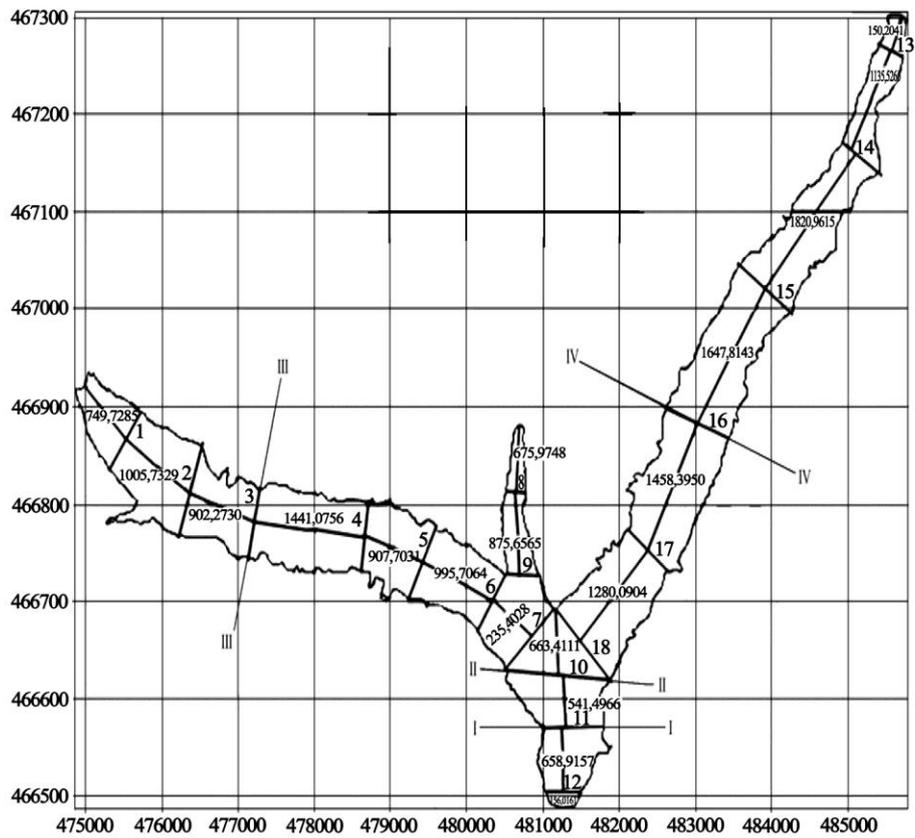
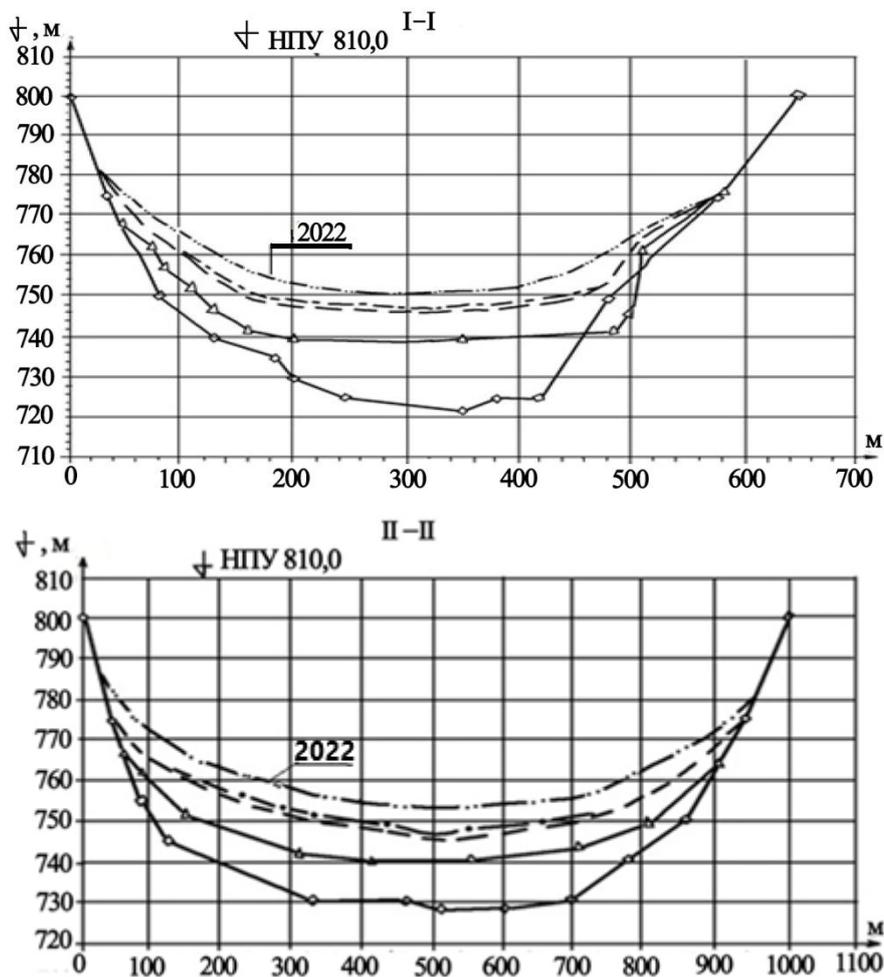


Рис. V.2.2. Расчетные сечения Жинвальского водохранилища (I, II, III, IV)



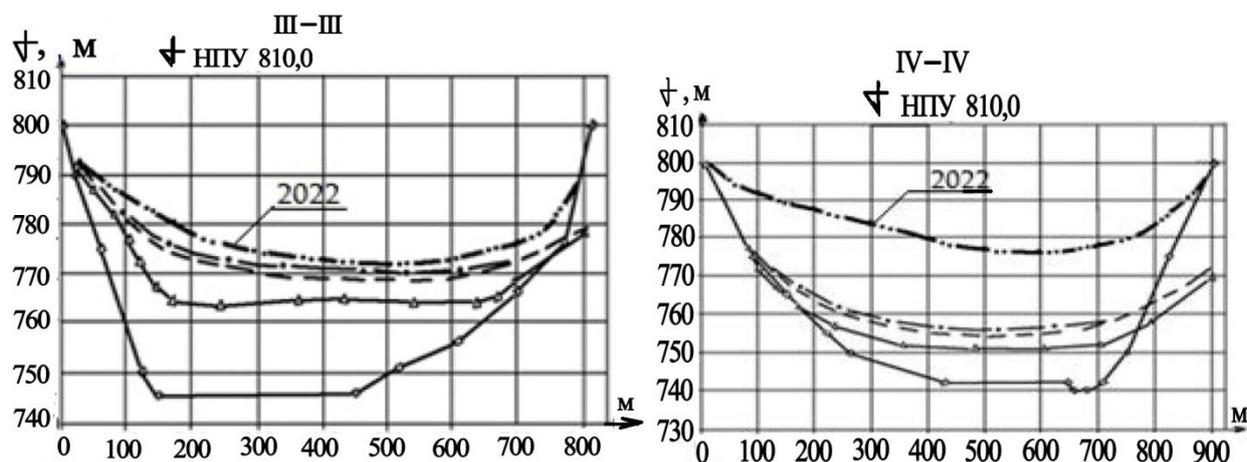


Рис. V.2.3. Динамика заиления Жинвальского водохранилища
 —○— — проектное; —△— — 2003 г.; — — — — 2011 г.; — · — — — 2017 г.; — · · — — — 2022 г.

Общий объем отложившихся наносов за первые 25 лет эксплуатации водохранилища (1985-2010 гг.) составил $W_n = 63,0$ млн m^3 , в 2017 г. – $W_n = 121,54$ млн m^3 , а в 2019 г. – $W_n = 125,0$ млн m^3 [Канделаки Н., 2019], к 2022 г. – $W_n = 126,0$ млн m^3 .

При продолжении осадконакопления в водохранилище с такой динамикой, по прогнозным расчетам, поверхность осадконакопления достигнет критической отметки $\nabla 760,0$ м в 2026 г., когда будет отложено 140 млн m^3 наносов. На этой отметке расположен водозабор гидроузла; близость поверхности осадочного материала к водозаборам приведет к увеличению мутности воды, в результате чего износ гидроагрегатов станет интенсивным, а качество питьевой воды ухудшится, водохранилище постепенно потеряет свою водорегулирующую функцию.

В экстремальных условиях при сбросе воды на гидроузел через донный тоннель, пропускная способность которого составляет 1000 m^3/c , перед порталом тоннеля развивается высокая скорость, что приведет к активизации оседания наносов.

В связи с тем, что водозабор и водозаборный тоннель расположены на близком расстоянии друг от друга, вода, поступающая в водозабор, будет иметь повышенную концентрацию мутности.

В проекте Жинвальского водохранилища срок, необходимый для заполнения мертвого объема, составляет 120-140 лет, а для полного заполнения водохранилища – 400-500 лет (рис. V.2.3; V.2.4; табл. V.2.1).

Как видно, фактический период осадконакопления в 2,5 раза короче предусмотренного проектом. На участке гидрологического поста Жинвальского водохранилища средний многолетний сток донных наносов оценивается в 20% от общего объема наносов.

К 2022 году на дне Жинвальского водохранилища накопилось 126,0 млн m^3 наносов. До 2010 г. седиментационный процесс идет менее интенсивно, а после 2010 г. – из-за частых паводков и увеличения объема воды в водохранилище – интенсивность осадконакопления возрастает до $W_n/t = 8,08$ млн $m^3/год$.

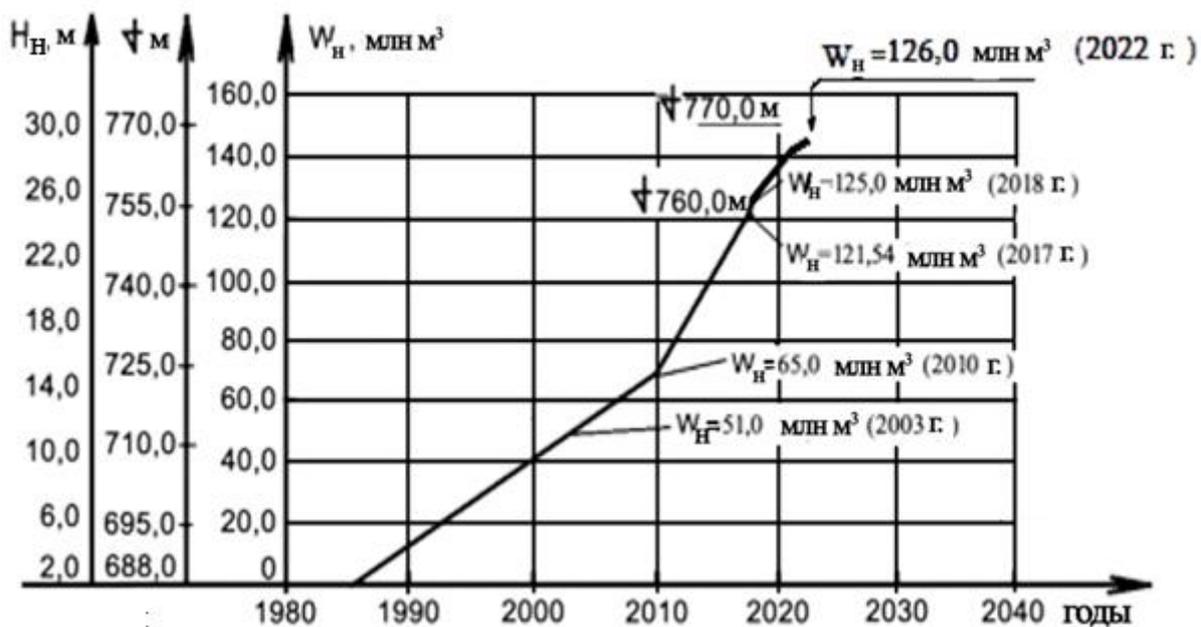


Рис. V.2.4. Динамика заиления дна Жинвальского водохранилища с начала эксплуатации (1985–2022 гг.); (H_n – толщина наносов у плотины, м)

Таблица V.2.1

Динамика седиментационных процессов на дне Жинвальского водохранилища

Год полевых работ	Полный объем водохранилища, $V_{\text{полн}}$, млн M^3	Год ввода в эксплуатацию	Отметка НПУ, м	Длина/ширина водохранилища (L/B), км	Максимальная глубина водохранилища (H), м (проектная)	Площадь зеркала водохранилища на НПУ (F), km^2 (расчетная)	Общий объем наноса (W_n), млн M^3	Интенсивность накопления наносов (W_n / t), млн M^3 /год
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2003	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	51,0	2,9
2010	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	65,0	2,9
2017	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	121,54	8,08
2022	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	126,0	8,1

Общий объем накопленных наносов в Жинвальское водохранилище в любой момент времени рассчитывается по эмпирической формуле:

$$W_n = 65,0 + 8,1 \cdot (t - 2010), \text{ млн } M^3, \quad (V.2.1)$$

где t – расчетный год (после 2010 г.).

При сохранении такой динамики накопления наносов к 2026 г. объем твердых наносов в Жинвальском водохранилище сравнится с мертвым объемом водохранилища ($W_n = V_{\text{мерт}} \approx 150,0$ млн M^3).

Сионское водохранилище

Краткое описание Сионской водохранилищной системы

Сионское водохранилище является первой очередью Самгорской оросительной системы ($V_{\text{полн.}} = 325,0$ млн м^3 , $V_{\text{мерт.}} = 25,0$ млн м^3 (рис. V.2.5). Водохранилище предназначено для регулирования годового стока речной воды и обеспечения оросительной водой Самгорской долины и каскада четырех малых ГЭС. Водохранилище находится в Тианетском районе на р. Иори. Долина реки в районе водохранилища имеет трапециевидную форму шириной 0,8-2,0 км. Уклон склонов 8° - 40° с многочисленными боковыми притоками и сухими оврагами, выносящими щебенистый материал реки. Среднегодовой сток наносов 14,6 $\text{м}^3/\text{с}$, максимальный расход воды 1%-ой обеспеченности 820,0 $\text{м}^3/\text{с}$.

В формировании чаши водохранилища принимают участие тектонические и речные эрозионно-аккумулятивные процессы. Правый берег крутой, каменистый с сильным делювиальным покровом, оползневыми явлениями. Левый берег сложен галечно-щебенистыми пролювиями.

В геологическом строении участвуют породы: нижнемеловые известняки, эоценовые песчаники, четвертичные конгломераты. Мощность современных отложений колеблется от 1,0 до 4,0 м.

Водохранилище руслового типа, высота земляной плотины 96,0 м. Забор воды для получения электроэнергии ($Q=23,0$ $\text{м}^3/\text{сек}$) и орошения ($Q=24$ $\text{м}^3/\text{сек}$) производится с левобережья водохранилища, с глубинным водозабором. Длина водохранилища 11,5 км; ширина – 0,8 км, максимальная – 2,0 км, средняя глубина – 31,4 м, максимальная – 68,6 м [Н. Канделаки, А. Силагадзе, 2017 (на грузинском языке)].

Уровненный режим характеризуется годовым циклом с осенним минимумом и поздневесенним максимумом. Амплитуда уровня воды составляет 55,0 м (рис. V.2.5).

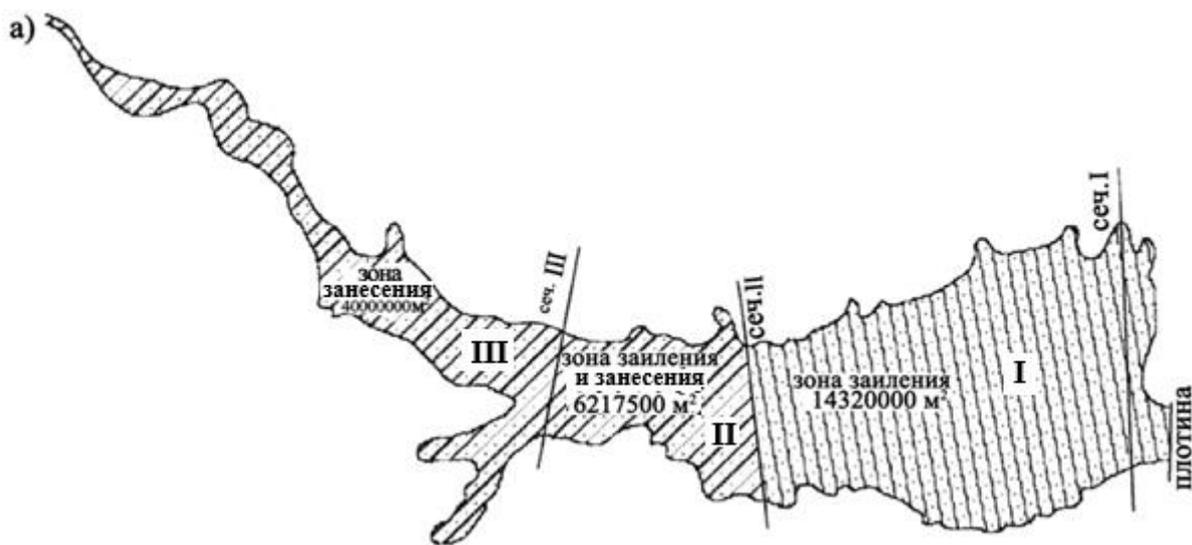


Рис. V.2.5. Схема Сионского водохранилища

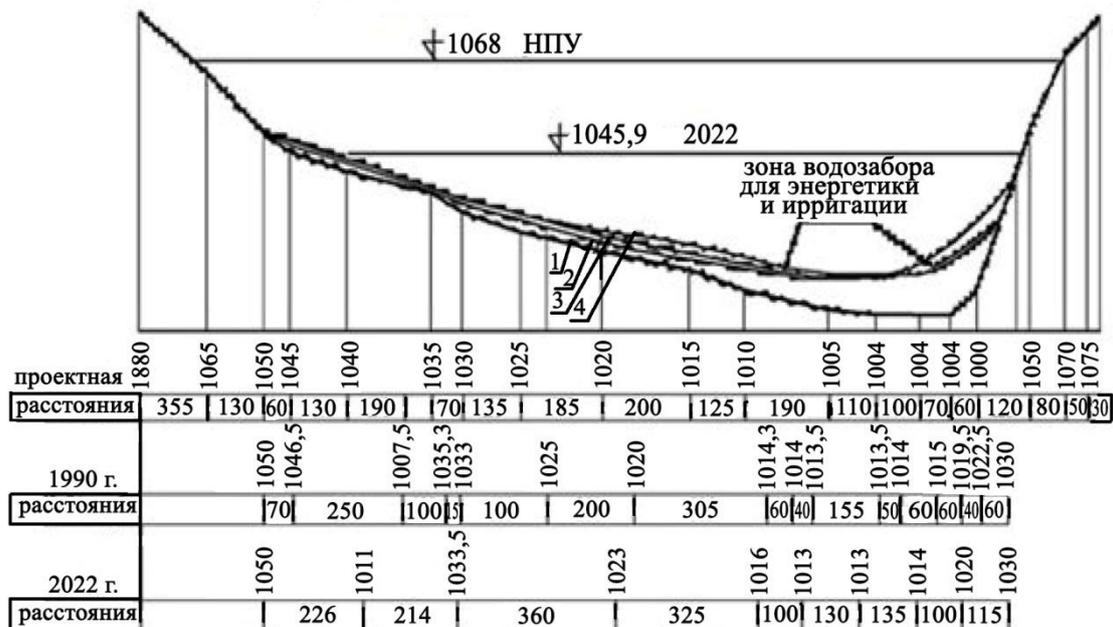
Ветровой режим характеризуется сильным изменением силы и направления ветра. Максимальная скорость ветра 26,0-28,0 м/с, ветер 37%-ой обеспеченности, волны развиваются в западном и юго-восточном направлениях. Максимальная высота волны 1,0-1,5 м; высота волны 50%-ной повторяемости – 0,6-0,7 м. При остановке ГЭС вода для орошения сбрасывается по ирригационному водоводу.

Седиментационные процессы на дне Сионского водохранилища

Вопросы оценки седиментационных процессов на дне Сионского водохранилища очень важны, поскольку этот объект был создан в середине прошлого века и уже находится в стадии "старения"¹. В водохранилище наблюдается быстрое увеличение объема отложившихся наносов, за счет чего уменьшается объем воды и водохранилище теряет свое основное назначение – функцию водонакопления и его регулирования. Полевые исследования, проведенные на Сионском водохранилище, включали батиметрию его дна, измерения которой проводились по батиметрической карте на 3-х выделенных участках: I – зона заиления, II и III – зоны занесения (рис. V.2.6).



б) Левый берег 1 - проект 1963 г. сечение I правый берег
 2 - 1990 г.
 3 - 30.03.2017 г.
 4 - 2022 г.



¹ Термин "старение" гидротехнических сооружений впервые был предложен академиком Ц.Е. Мирцхулава [Мирцхулава Ц.Е., 1999].

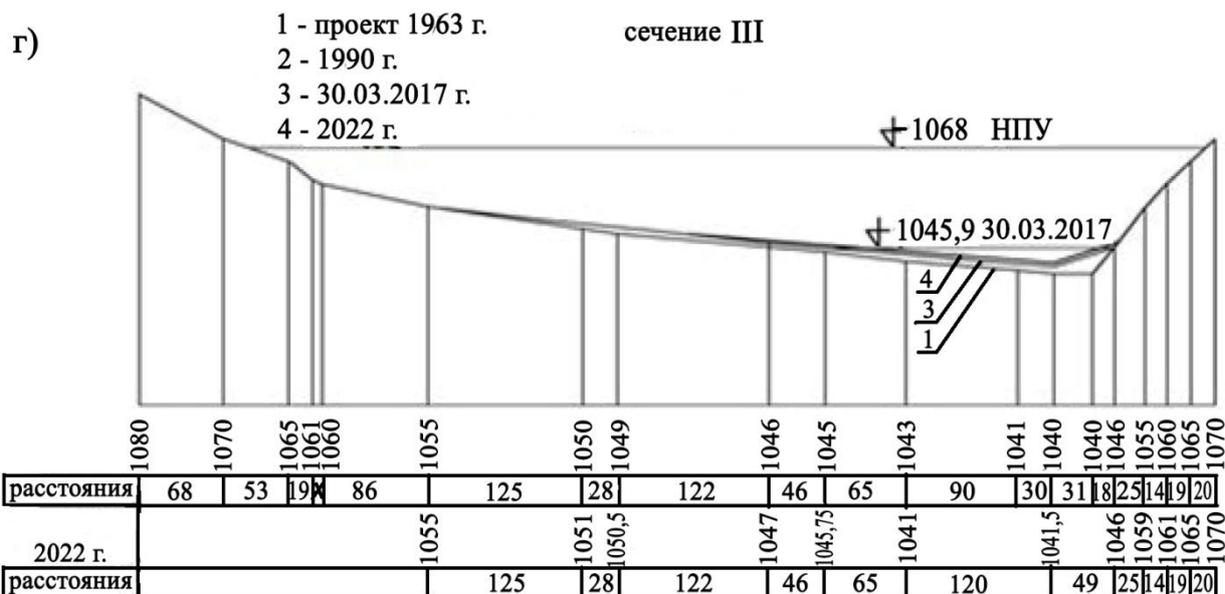
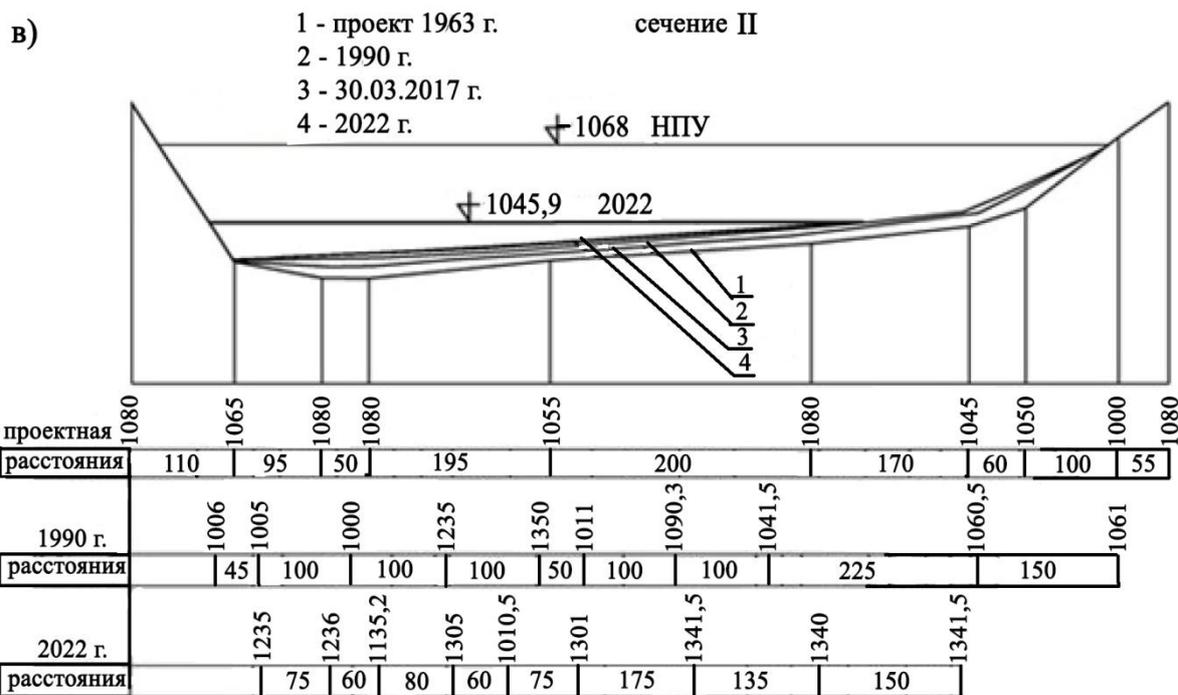


Рис. V.2.6. Динамика заиления дна Сионского водохранилища с начала эксплуатации (1963-2022 гг.): а) – данные 2022 г.; б) – I сечение; в) – II сечение; г) - III сечение

Результаты анализа существующих полевых работ, проведенных нами, показаны на рисунке V.2.7 и в таблице V.2.2.

К 2022 г. на дне Сионского водохранилища накопилось до 26,0 млн м³ наносов, а высота наносов в районе плотины составляет до 25,0 м. С 1963 г. процесс осадконакопления был практически равномерным, и объем осадка, накопившегося на дне водохранилища (т. е. с 1963 г. до любого расчетного времени), можно рассчитать по эмпирической формуле:

$$W_{н.} = 0,45 \cdot (t - 1963), \text{млн м}^3, \quad (V.2.2)$$

где t – расчетный год.

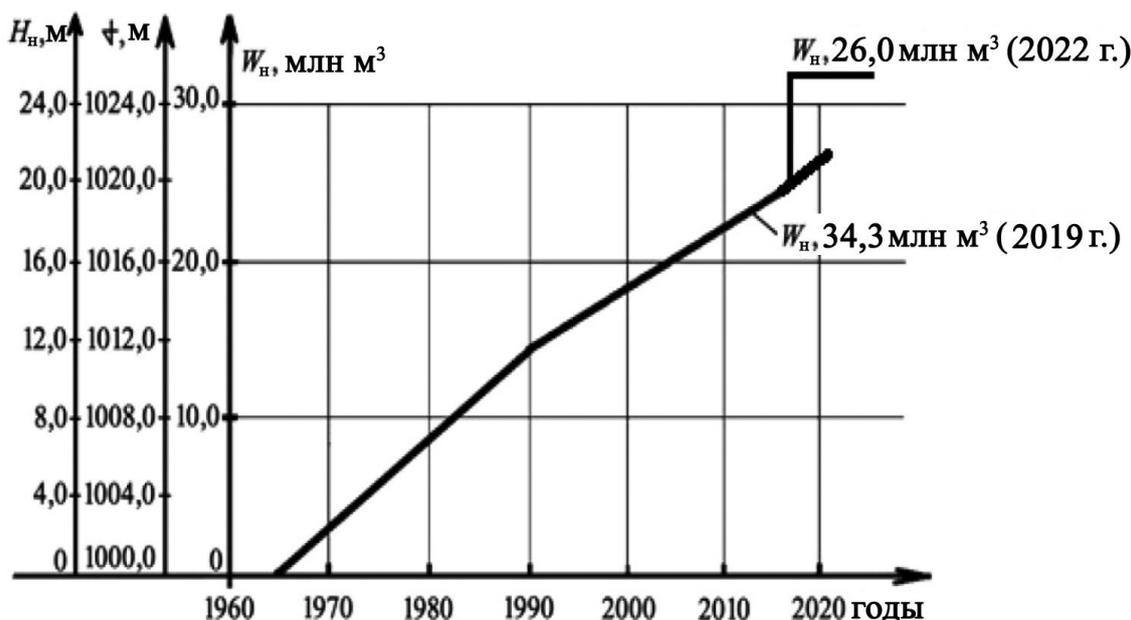


Рис.V.2.7. Динамика заиления дна Сионского водохранилища с начала эксплуатации (1963-2022 гг.) (H_n – толщина наносов у плотины, м)

Таблица V.2.2

Показатели седиментационных процессов на дне Сионского водохранилища

Год полевых исследований	Проектный полный объем водохранилища $V_{полн}$, млн m^3	Год ввода в эксплуатацию	Отметка НПУ, м	Длина и ширина водохранилища (L/B), км	Максимальная глубина водохранилища (H), м	Площадь зеркала водохранилища на отметке НПУ (F), km^2	Общий объем наносов (W_n) млн m^3	Интенсивность накопления наносов (W_n/t) млн $m^3/год.$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1990	325,0	1963	1068,0	11,5/20	68,0	11,4	13,12	0,47
2017	→	→	→	→	→	→	24,30	0,43
2022	→	→	→	→	→	→	26,0	0,45

Тбилисское водохранилище

Краткое описание Тбилисской водохранилищной системы

Тбилисское водохранилище является основным узлом в комплексе Земо-Самгорской оросительной системы. Водохранилище создано на основе трех бывших соленых озер, питается из Верхне-Самгорского канала р. Иори (расход 13 $m^3/сек$) и из Жинвальского водохранилища (расход 15 $m^3/сек$).

Впадина, образованная тремя озерными котловинами, вытянута с северо-запада на юго-восток, имеет длину 8,0 км и ширину до 2,0 км, максимальная глубина – 45,0 м, средняя – 26,0 м. Дно водохранилища сложено делювиально-пролювиальными отложениями, глиной и окаймлено плоскими террасированными поднятиями.

Проектный полный объем водохранилища составил $V_{полн} = 308,0$ млн m^3 , полезный

объем – $V_{\text{полн}} = 155,0$ млн м^3 . В 80-х годах прошлого века в связи с негативными явлениями (фильтрация воды с периметра двух бетонных дамб и затопление жилого массива г. Тбилиси – ТМК) уровень воды был снижен на 10,0 метров – с $\nabla 548,0$ м до $\nabla 538,0$ м. Максимальный полный объем водохранилища уменьшился и составляет $V_{\text{полн}} = 215,0$ млн м^3 , $V_{\text{полн}} = 155,0$ млн м^3 , $V_{\text{мерт}} = 60,0$ млн м^3 (рис. V.2.8).

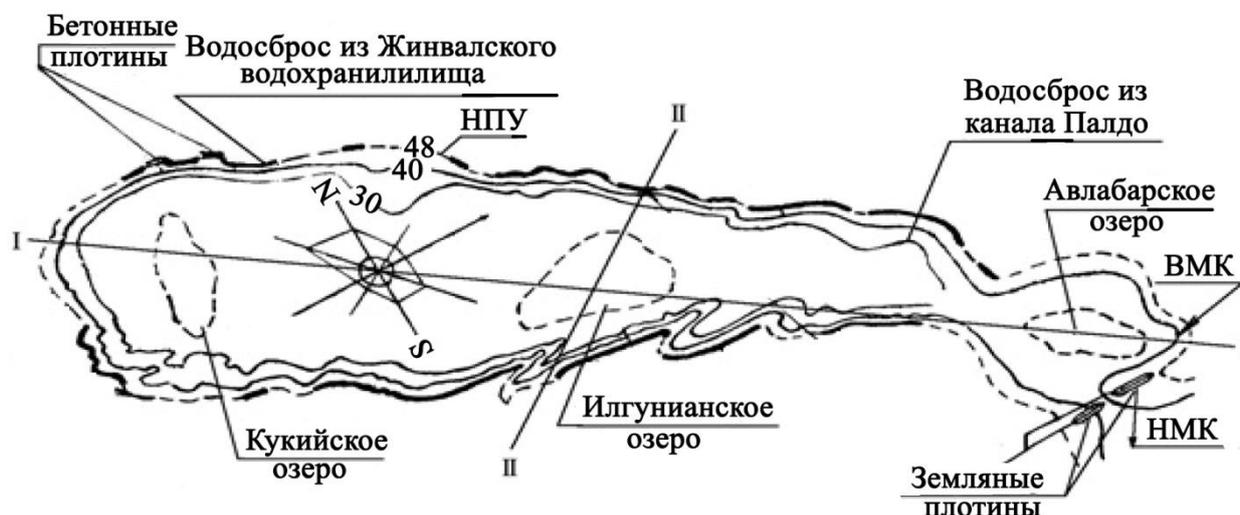


Рис. V.2.8. Схема Тбилисского водохранилища
I - I, II - II - исследованные участки

Водохранилище создано двумя бетонными плотинами высотой 9,0 м и 12,0 м и двумя земляными плотинами высотой 10,0 м и 12,0 м.

В геологическом строении дна водохранилища участвуют песчаники и сланцевые глины третичного возраста. Южная его часть покрыта четвертичными отложениями. В северной части залегают карстовые породы. Основными горными породами являются песчаники, аргиллиты и алевролиты. Уровенный режим нестабилен. Сработка уровня воды 13,0 м. Ветровое волнение направлена вдоль водохранилища. Скорость ветра 23,0-34,0 м/с, обеспеченность ветра 2,55%, высота волн 1,2-1,4 м. Волнения характеризуется сильной нерегулярностью.

Водохранилище используется для орошения и питьевого водоснабжения. Забор воды в нижний оросительный магистральный канал осуществляется в юго-восточной части водохранилища водозабором башенного типа. В этом же районе берется вода для водоснабжения г. Тбилиси и г. Рустави.

Седиментационные процессы на дне Тбилисского водохранилища

Процессы осадконакопления на дне **Тбилисского водохранилища**, в основном, происходят в котловине затопленного Илгунианского озера (рис. V.2.8). Тбилисское водохранилище создано в середине прошлого века и уже находится в стадии «старения». Полевые исследования, проведенные на Тбилисском водохранилище, включали батиметрию его дна в двух сечениях (I - I, II - II); нанос, в основном, скапливается в котловине озера Илгуниани (рис. V.2.8). Эта особенность процесса обусловлена двумя

факторами: 1) сильным волновым воздействием в сторону озера Илгуниани, из-за которого нанос стекает в его котловину, 2) крутым уклоном берегов этого района и небольшими заливами (рис. V.2.9; V.2.10; V.2.11; табл. V.2.3).

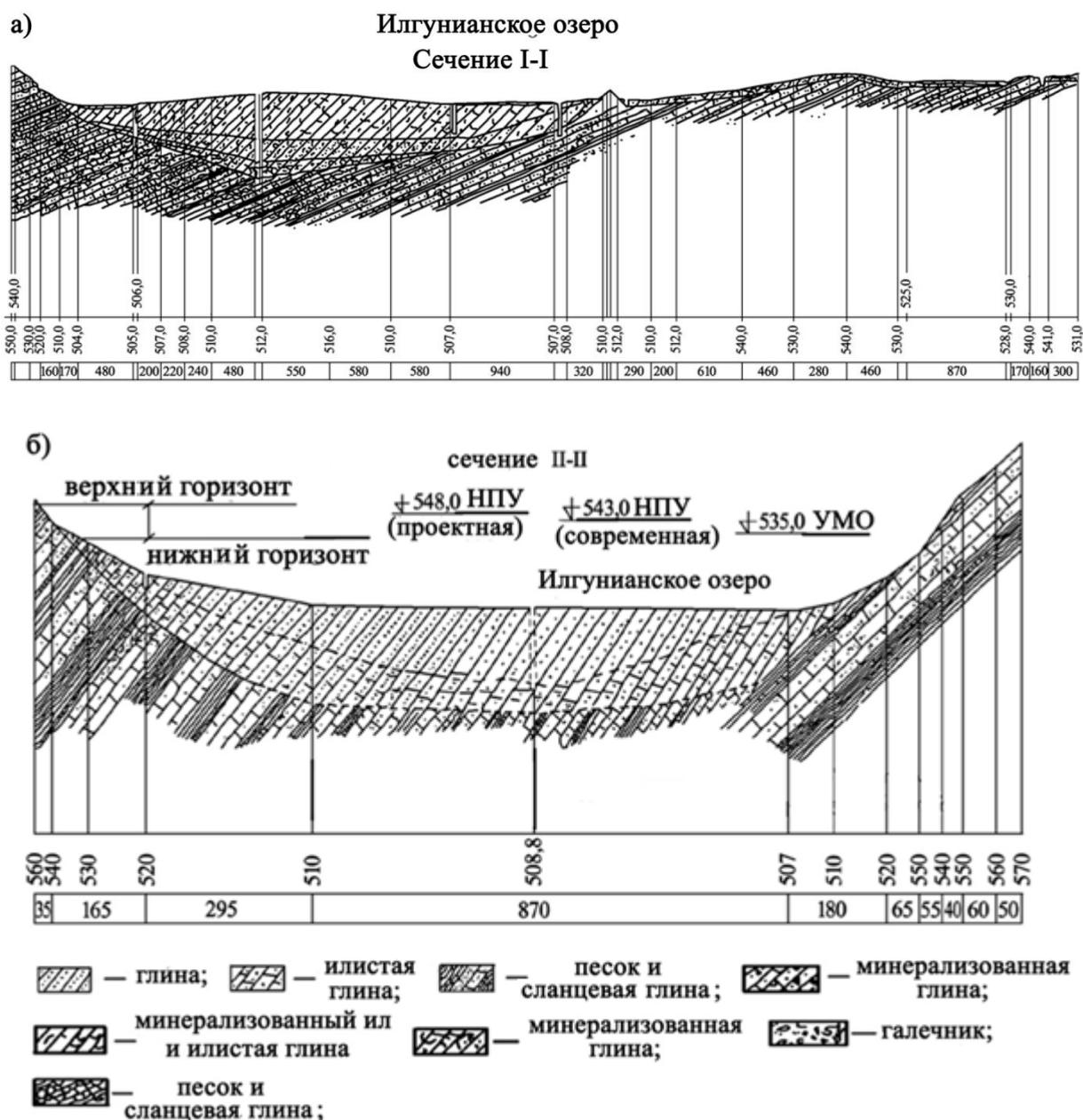


Рис. V.2.9. Процесс седиментации на дне Тбилисского водохранилища
а) поперечный разрез озера Илгуниани (I-I); б) продольный разрез озера Илгуниани (II-II)

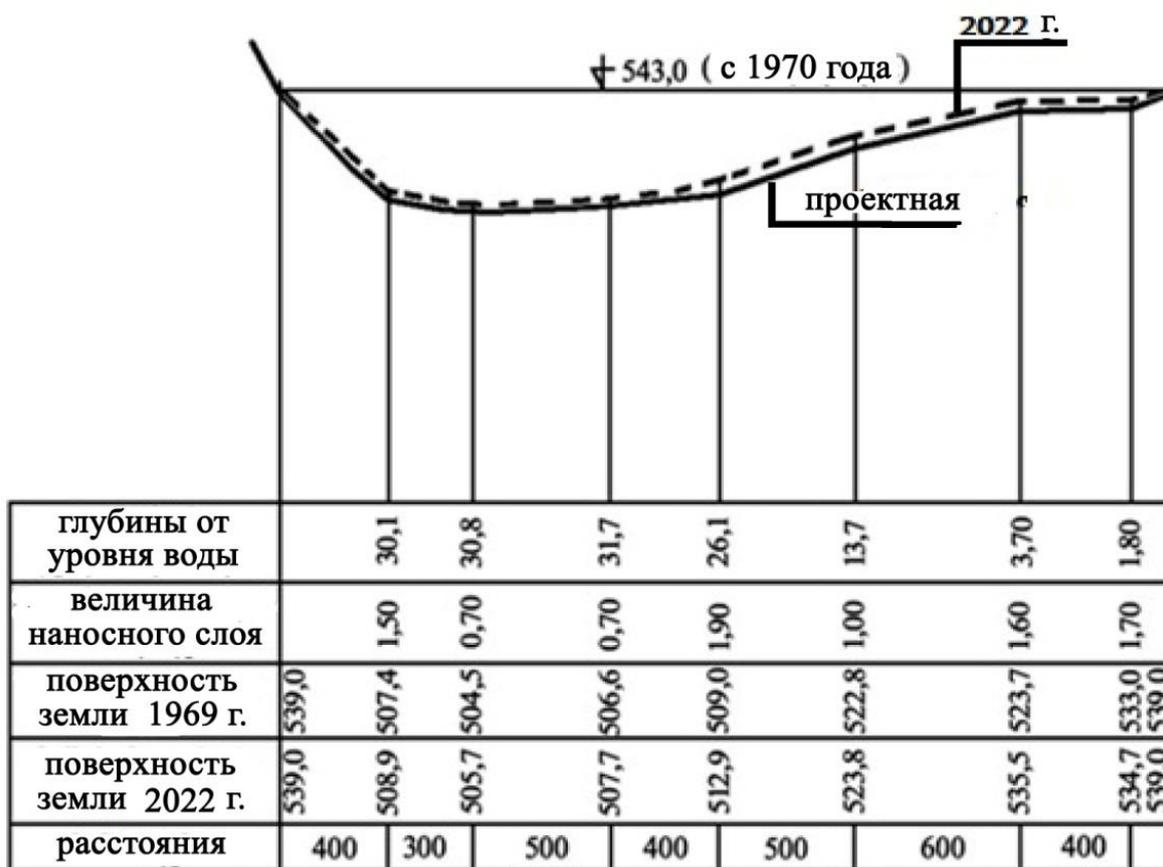


Рис. V.2.10. Профиль объемов наносов на дне Тбилисского водохранилища (в котловине бывшего озера Илгуниани) (у правого берега)
 ————— – проектный профиль; - - - - - – профиль 2022 г.

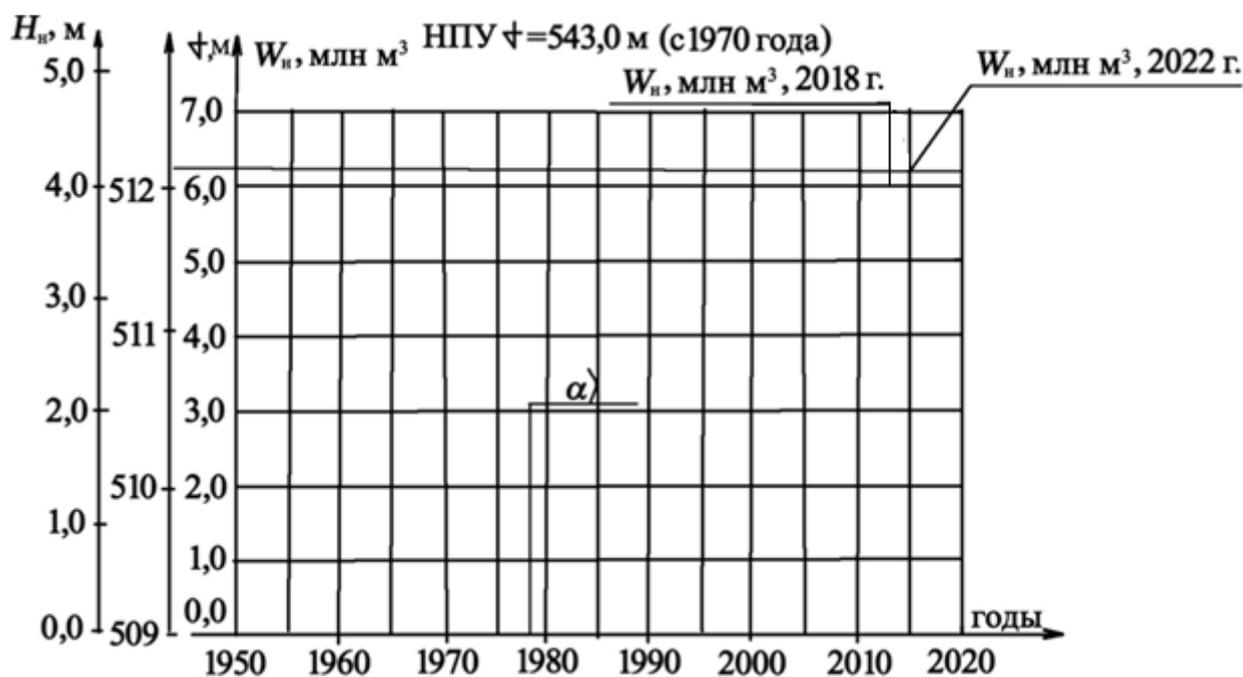


Рис. V.2.11. Динамика осадконакопления на дне Тбилисского водохранилища с начала эксплуатации (толщина H_n – наносов на дне озера Илгуниани)

Седиментационные процессы на дне Тбилисского водохранилища

Год	Объем водохранилища, млн м ³			Количество накопленного осадка (в котловине озера Илгуниани), млн м ³	% (V _{полн})	Количество накопленных осадков за год млн м ³ /год.
	V _{полн}	V _{мерт}	V _{полез}			
Проектный	308,0	60,0	60,0			
1970 *)	215,0	—	60,0			0,15
1978	215,0	—	60,0	3,23	1,5	0,16
2022	215,0	—	—	9,6	3,0	0,182

*) Из-за фильтрационных явлений с 1970 г. уровень воды не превышает отметку $\nabla 543,0$ м, а V_{полн} \leq 215,0 млн м³.

К 2022 году на дне Тбилисского водохранилища скопилось до 9,6 млн м³ наносов. Динамика процесса седиментации рассчитывается по эмпирической формуле:

$$W_n = 3,23 + 0,18(t - 1970) \text{ млн м}^3, \quad (\text{V.2.3})$$

где t – расчетный год.

Храмское (Цалкское) водохранилище

Краткое описание Храмской водохранилищной системы

Храмское (Цалкское) водохранилище расположено на р. Храми. Водоохранилище расположено в 117,0 км от впадения реки Храми в р. Куру (рис. III.2.4). Ширина долины в районе водохранилища 0,7÷0,8 км. Среднегодовой сток воды на участке плотины 9,78 м³/с. Общий объем Храмского водохранилища V_{полн} = 312,0 млн м³.

Вода из Храмского водохранилища подается на действующие Храм-ГЭС-1 и Храм-ГЭС-2. Отфильтрованная вода, поступающая из Храмского водохранилища, обеспечивает работу Дашбашской малой ГЭС, ее мощность составляет 1260 кВт. Установленная мощность действующих ГЭС составляет: Храм-ГЭС-1 – 112,8 МВт; Храм-ГЭС-2 – 110,0 МВт; ГЭС на магистральном канале – 1,0 МВт; установленная мощность проектных ГЭС составляет: Храм-ГЭС-3 – 12,0 МВт; Храм-ГЭС-4 – 9,0 МВт; Дагатинская ГЭС – 1,9 МВт; Храм-ГЭС-6 – 1,0 МВт; Храм-ГЭС-7 – 9,2 МВт; Нахидурская ГЭС-7,1 МВт. В последние годы воду из водохранилища сбрасывают для мелиоративных целей. Водоохранилище высокогорное, руслового типа, крутизна береговых откосов от 5° до 90°, длина – 14,5 км, средняя ширина – 2,4 км, максимальная – 3,5 км, средняя глубина – 9,3 м, максимальная – 25,0 м. Район водохранилища характеризуется суровым климатом, годовая температура колеблется от +26°С до 30°С. Толщина ледового слоя водохранилища 18-25 см, продолжительность зимы 2-3 месяца. Уровненный режим определяется работой ГЭС: сработка уровня достигает 14,5 м (по проекту, рис. V.2.12). Скорость сработки уровня воды достигает 1,0-6,0 см/сут.

Ветровой режим характеризуется значительными изменениями. Максимальная скорость ветра 35,0 м/с, максимальная повторяемость северных ветров. Высота волны с наибольшей повторяемостью – 9,0-12,0 м/с, при обеспеченности – 40% до 0,75-1,15 м. Высота

штормовой волны 1,5-1,8 м. Работают две ГЭС – Храм-ГЭС-I и Храм-ГЭС-II. Первая ГЭС работает водой, подаваемой из Храмского водохранилища; вторая – водой, подаваемой тоннельной деривацией при падении с высоты 400 метров ниже Храм-ГЭС-I. Вода, спускаемая из Храм-ГЭС-II, используется для орошения. В состав сооружений плотины входит каменная насыпная плотина длиной 113,0 м и высотой 32,0 м со стальным экраном, водосбросным и водозаборным щитами, водозабор-глубинный.

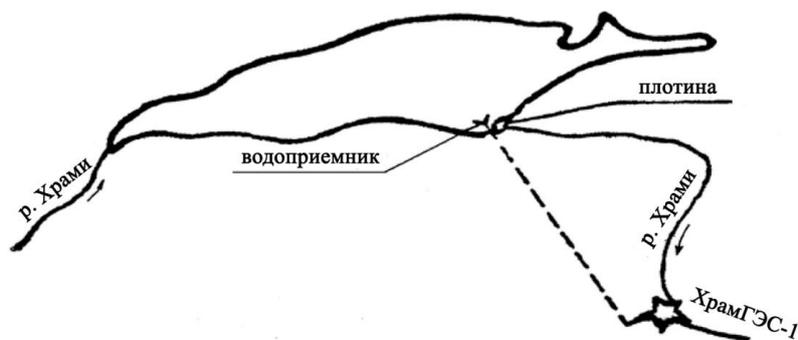


Рис. V.2.12. Схема Храмского водохранилища

Седиментационные процессы на дне Храмского водохранилища

Количество наносов, накопившихся на дне Храмского (Цалкского) водохранилища, определено на основании сопоставления карт дна водохранилища, составленных до заполнения водохранилища в 1947 г. и карт, полученных нами с помощью эхолотации на (рис. V.2.13; V.2.14; V.2.15).

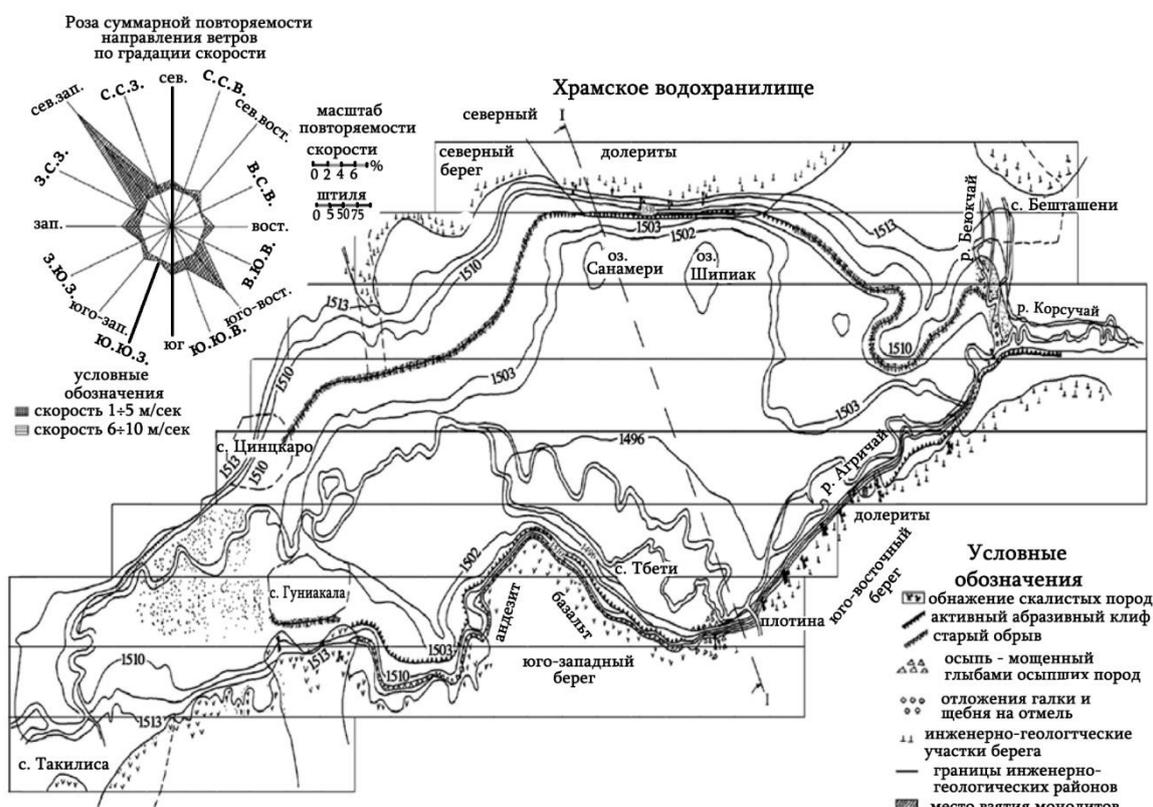


Рис. V.2.13. Топография дна Храмского водохранилища

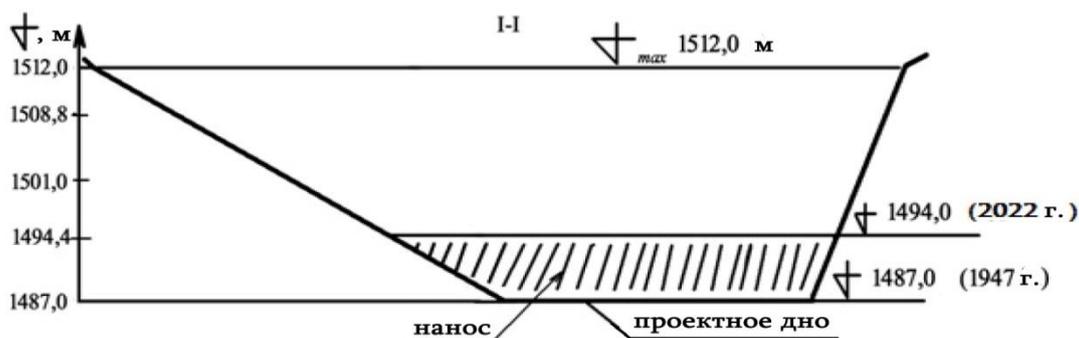


Рис. V.2.14. Динамика заиления Храмского водохранилища с начала эксплуатации (1947-2022 гг.)

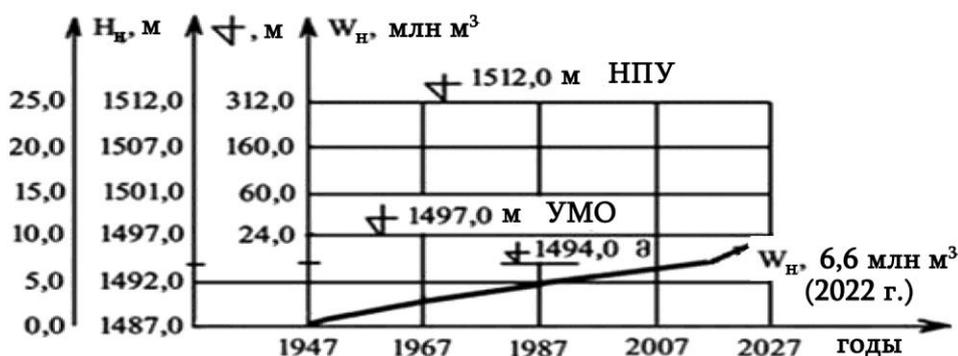


Рис. V.2.15. Динамика заиления дна Храмского водохранилища с начала эксплуатации (1947–2022 гг.) (H_n – мощность наносов у плотины)

К 2022 году на дне Храмского водохранилища скопилось 6,6 млн м³ наносов. Интенсивность накопления наносов $W_n/t = 0,092$ млн м³/год.

Общий объем накопленных наносов в Храмском водохранилище рассчитывается по эмпирической формуле:

$$W_n \approx 0,092 \cdot (t - 1947) \text{ млн м}^3, \quad (V.2.4)$$

где 0,092 – интенсивность накопления наносов после сооружения водохранилища, млн м³ год; t – расчетный год.

Шаорское водохранилище

Краткое описание Шаорской водохранилищной системы

Шаорское водохранилище ($V_{полн} = 90,0$ млн м³) является первой ступенью Шаори-Ткибульского каскада (рис. III.2.5). Его особенностью является расположение в карстовом районе. Питающие реки водохранилища – Диди Чала и Ткибула – впадают в карстовые ямы на дне хребта, а затем выходят на поверхность земли.

Это обстоятельство привело к созданию оригинальной каскадной схемы. На плато Шаори построена платина, которая позволяет воде попадать в карстовые ямы. Подача воды из водохранилища на ГЭС осуществляется по напорным тоннелям, через хребет Накерала. С геологической точки зрения Шаорская впадина сложена породами Четвертичного периода, которые представлены аллювиальными и делювиальными отложениями и глинами.

Водохранилище горного типа, треугольной формы. Его склоны крутые ($\alpha=20^{\circ}-30^{\circ}$) и низкие, за исключением юго-восточного и северо-западного, где высота берегов достигает 4,0–5,0 м, а уклон – $60^{\circ}\div 80^{\circ}$, протяженность составляет 7,5 км, средняя ширина – 1,76 км, максимальная – 3,0 км, средняя глубина – 6,3 м, а максимальная – 12,3 м. Водохранилище годового регулирования. Максимальная высота сработки уровня воды в годовом разрезе составляет 13,0 м, объем и площадь зеркала изменяются в зависимости от уровня воды.

Климат влажный с жарким летом, холодной зимой и обильными осадками. Амплитуда температур воздуха $24^{\circ}\text{C}-25^{\circ}\text{C}$. Толщина снежного покрова 75,0 см. Преобладают южные и восточные ветры. Максимальная скорость ветра до 20,0 м/с (январь-март), обеспеченность штиля – 52%. Горные хребты защищают водохранилище от воздействия ветра. Максимальная высота волн 0,7-0,9 м, небольшой повторяемости, так как максимальная скорость ветра приходится на период, когда вода покрыта льдом.

Водохранилище используется для энергетических целей и технического водоснабжения г. Ткибули. Расчетный напор на ГЭС – 473,0 м, общая мощность 38400,0 кВт (рис. V.2.16).



Рис. V.2.16. Схема Шаорской водохранилищной системы

В состав гидротехнических сооружений водохранилища входят: каменная плотина с глиняным экраном длиной 1210,0 м и высотой 11,5 м, донный водосброс с расходом $26,0 \text{ м}^3/\text{с}$, поверхностные водосбросы. При расходе $30,0 \text{ м}^3/\text{с}$ подводящий канал по дну водохранилища имеет длину 3706,0 м, глубину 5,0 м и водозабор ГЭС (рис. V.2.16).

Седиментационные процессы на дне Шаорского водохранилища

Объем наносов на дне Шаорского водохранилища был определен в результате сравнения проектных карт дна водохранилища (составленных до заполнения водохранилища в 1955 г.) и проведенного нами эхолотного зондирования дна (рис. V.2.17; V.2.18; V.2.19).



Рис. V.2.17. Топография дна Шаорского водохранилища

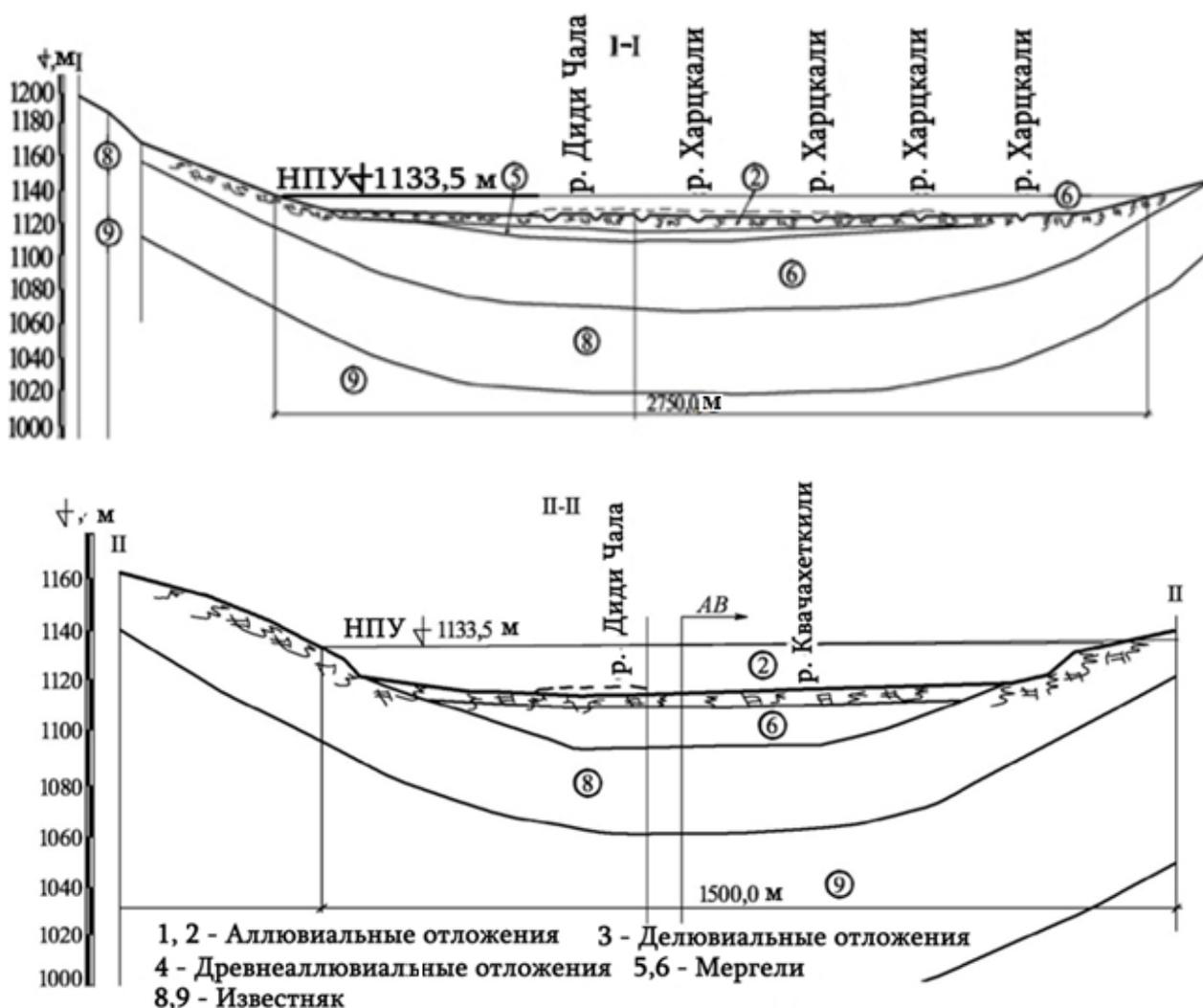


Рис. V.2.18. Динамика заиления Шаорского водохранилища с начала его эксплуатации (1955–2022 гг.)
 ————— Проектный; - - - - - к 2022 году

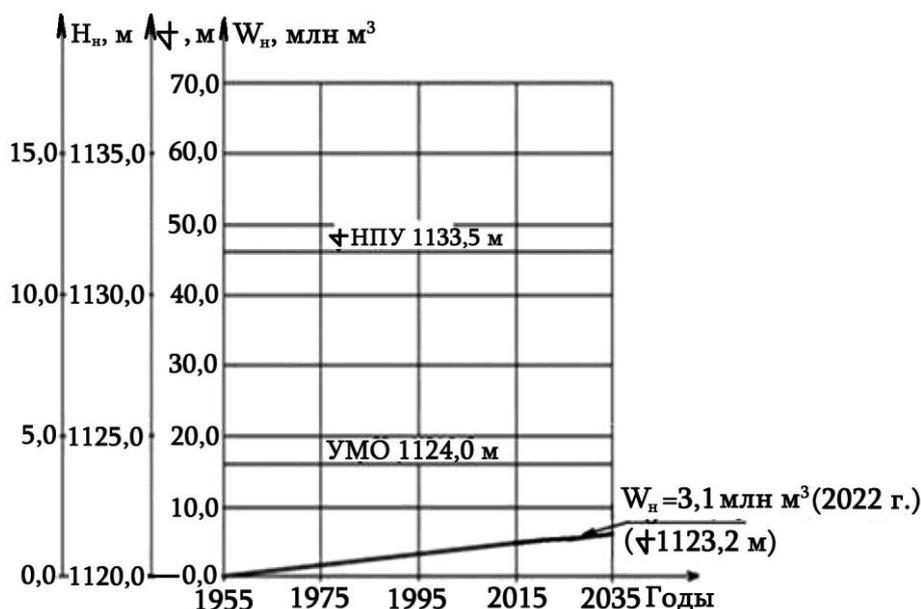


Рис. V.2.19. Динамика заиления дна Шаорского водохранилища с начала эксплуатации (1955–2022 гг.) (H_n – мощность наносов у плотины)

К 2022 году на дне Шаорского водохранилища скопилось 3,1 млн m^3 наносов. Интенсивность накопления наносов $W_{н/т} = 0,05$ млн m^3 /год.

Общий объем накопленных наносов в Шаорском водохранилище в любой момент времени рассчитывается по эмпирической формуле:

$$W_n \approx 0,05 \cdot (t - 1955), \text{ млн } m^3, \quad (V.2.5)$$

где 0,05 – интенсивность накопления наносов после возведения водохранилища, млн m^3 ; t – расчетный год.

Ладжанурское водохранилище

Краткое описание Ладжанурской водохранилищной системы

Гидротехническая схема водохранилищной системы состоит из бетонной арочной плотины высотой 69,0 м, Ладжанурского водозабора ($Q = 100,0$ m^3 /с) и обводного тоннеля (рис. III.2.3; V.2.20). После переброски стока р. Цхенис-Цкали и слияния с р. Ладжанури получен напор 134,0 m^3 /с, полный объем водохранилища $V_{полн} = 24,0$ млн m^3 . Плотина Ладжанури – первая арочная бетонная плотина, положившая начало строительству арочных плотин и подземных гидроэлектростанций в Грузии. Водоохранилище расположено в долине с выпуклыми берегами. Среднегодовой сток реки Ладжанури на участке плотины составляет 10,5 m^3 /с, максимальный – 18,30 m^3 /с, из р. Цхенисцкали в Ладжанурское водохранилище подается 60,0 m^3 /с воды.

Геологическое строение долины сложное. Нижняя часть долины сложена из толстослоистых, крепких известняков, относящихся к среднему и нижнему Эоцену и Палеоцену; верхние участки северного и южного берегов сложены песчано-мергелистыми глинами, на западе они сменяются сланцеватыми майкопскими олигоценовыми глинами. Оба берега водохранилища широко представлены песчаниками. Подъем уровня воды в водохранилище привел к затоплению грунтовых вод, в результате чего активизировался

оползень, весь юго-западный склон оползневой; в восточной части водохранилища также развиваются оползни в русле р. Хелешури-Геле.



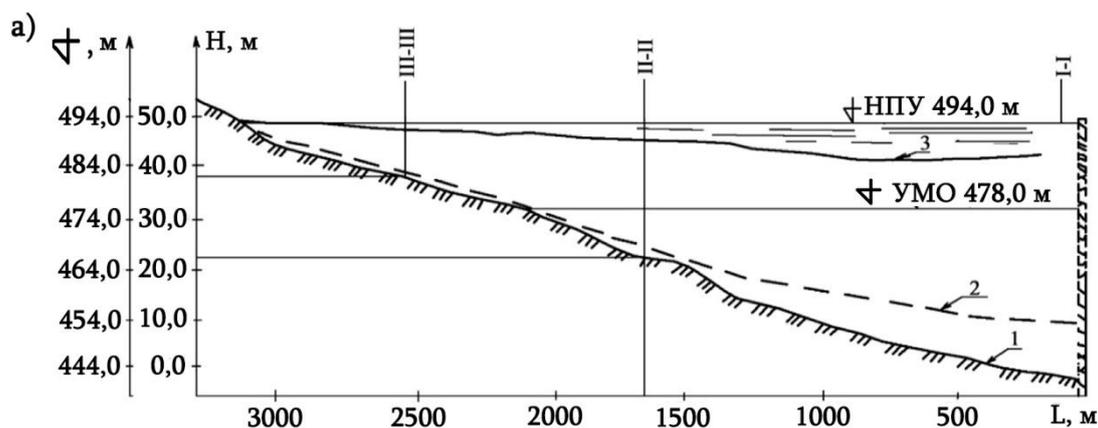
Рис. V.2.20. Схема гидротехнических сооружений Ладжанурской ГЭС

Водохранилище **руслового типа**. Имеет удлинненно-овальную форму. Длина 3,2 км, средняя ширина – 0,28 км, максимальная – 0,45 км; средняя глубина – 30,0 м, максимальная – 70,0 м. Уровенный режим нестабилен. Сработка уровня – 16,0 м, однако в связи с заполнением водохранилища наносами вода не регулируется и ГЭС работает по стоку. Водохранилище окружено высокими горами, защищающими его от ветра. Штиль 60%, скорость ветра 8,0-10,0 м/с. Климат влажный с частыми дождями. Водохранилище используется в энергетических целях. Напор 134,0 м. В состав сооружений головного узла входят: арочная бетонная плотина высотой 69,0 м; водозабор с двумя отверстиями с расходом 100,0 м³/с; донные промывные галереи переходят в туннель диаметром 6,0 м, протяженностью 3706,0 м. Водоразбор рассчитан на 30,0 м³/с. Подводящий канал на дне водохранилища глубиной 5,0 м.

Седиментационные процессы на дне Ладжанурского водохранилища

Последние исследования водохранилища проводились грузинским исследователем в середине прошлого века [Гвелесиани Л.Г., Шмальцель Н.П., 1953].

По результатам наших полевых работ были построены поперечные профили на дне Ладжанурского водохранилища (рис. V.2.21; V.2.22).



Ткибульское водохранилище

Краткое описание Ткибульской (Дзеврульской) водохранилищной системы

Ткибульское водохранилище расположено на р. Ткибули. Головной узел расположен в 12,0 км от истока р. Ткибули (рис. V.2.23).

Ткибульская водохранилищная система дополнительно питается отработанной водой из Шаорской ГЭС. Водохранилище создано в Ахалсопельской котловине перед впадением р. Ткибули в карст. Котловина имеет моноклинную структуру и упирается в известняки.



Рис. V.2.23. Схема Ткибульской водохранилищной системы;

В геологическом строении чаши водохранилища участвует комплекс различных горных пород. Склоны сложены юрскими и меловыми отложениями. Породы характеризуются слабой водопроницаемостью, в связи с чем исключается просачивание воды из северной части водохранилища. Исключение составляют трещиноватые и закарстованные ургонские известняки. В плане фильтрации более опасен участок южнее плотины, сложенный из верхнемеловых карстовых известняков.

Коренные породы Юры и Мела залегают под тяжелыми Четвертичными отложениями на дне водохранилища. Озерные аллювиальные отложения представлены глинами толщиной 100,0 м, со стороны плотины их толщина увеличивается до 350,0 м. На западном склоне водохранилища, сложенном туфо-песчаниками, хорошо выражена аллювиальная зона толщиной 0,5-1,05 м. На склонах встречаются отложения глин с большим количеством известняков толщиной 1,0-1,5 м, редко – 4,0 м. Средняя высота берегов от 5,0 до 200,0 м, уклон 25°-30°, местами – 45°-50°. Водохранилище имеет сильно изрезанную береговую линию, уходящую вглубь слияния рек Ткибули и Гела, где образуются узкие вытянутые бухты. Их длина составляет до 6,0 км, средняя ширина – 1,9 км (максимальная – 3,7 км), средняя глубина – 16,0 м (максимальная – 32,0 м).

Водохранилище сезонного регулирования. Максимальная расчетная сработка уровня

6,0–7,0 м. Объем водохранилища и площадь зеркала незначительно изменяются в процессе эксплуатации. Ветры, в основном, восточные. Максимальная скорость ветра – 34,0 м/с, средняя – 11,0-15,0 м/с, обеспеченность ветра – 21%, штиль – 50%. Расположение водохранилища способствует образованию волн высотой 0,8-0,1 м.

Водохранилище используется в энергетических целях. Расчетный напор 293,0 м, мощность 80,0 тыс кВт. Сооружение руслового типа с земляной плотиной высотой 36,0 м. Забор воды осуществляется напорным двухниточным водоводом, который расположен на правом берегу. Вода проходит через напорный тоннель ($Q = 34,0 \text{ м}^3/\text{с}$) и далее по четырем ветвям подается на 4 турбины. Сброс воды с ГЭС в русло реки осуществляется водоотводящим каналом.

Седиментационные процессы на дне Ткибульского водохранилища

Ткибульское водохранилище (введено в эксплуатацию в 1956 г., $V_{\text{пол}} = 84,0 \text{ млн м}^3$) относится к типу горных водохранилищ, так как его отметка уровня (НПУ) выше $\nabla 400,0 \text{ м}$ (рис. V.2.24; V.2.25; V.2.26).



Рис. V.2.24. План Ткибульского водохранилища

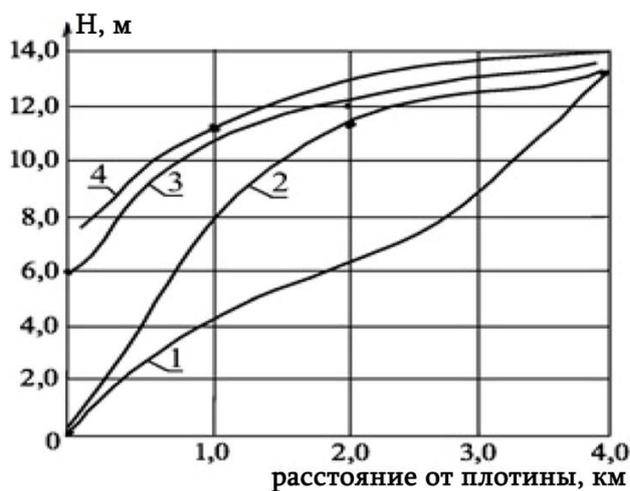


Рис. V.2.25. Динамика седиментационных процессов на дне Ткибульского водохранилища (1960-2022 гг.)

1 — проектные отметки русла реки Ткибула,
2 — 1960 г., 3 — 1966 г., 4 — 2022 г.

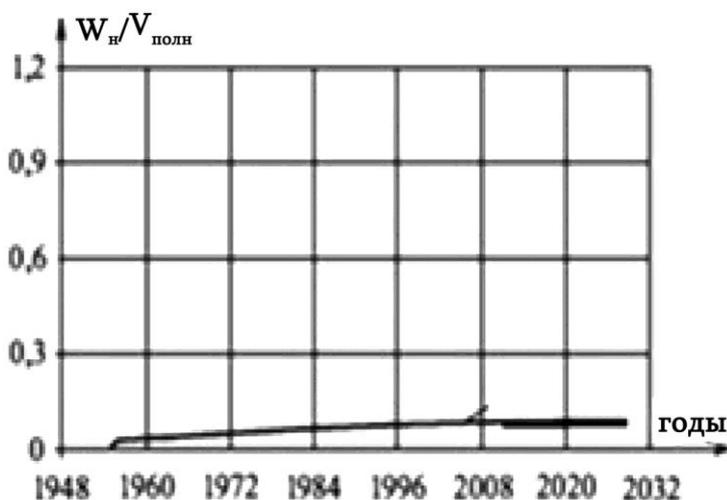


Рис. V.2.26. Интенсивность расчетных седиментационных процессов на дне Ткибульского водохранилища

К настоящему времени на дне Ткибульского водохранилища накоплено $W_n = 3,95$ млн m^3 наносов, а интенсивность накопления наносов составляет $W_n/t = 0,063$ млн $m^3/год$.

Прогнозное уравнение седиментационных процессов на дне Ткибульского водохранилища имеет следующий вид:

$$W_n = 0,063 (t - 1956) \text{ млн } m^3, \quad (V.2.7)$$

где t — расчетный год эксплуатации водохранилища после постройки (1956г.).

Разработка прогнозных групп седиментационных процессов на дне Жинвальского, Сионского, Тбилисского, Храмского, Шаорского, Ладжанурского и Ткибульского водохранилищ

Региональные особенности водохранилищ Грузии определяют интенсивность седиментационных процессов и распространение наносов.

Как показали наши исследования, осадконакопление на дне горных водохранилищ происходит в зависимости от двух типов водохранилищ. Прогнозирование осуществляется с помощью эмпирических зависимостей и кривых (рис. V.2.27; V.2.28).

Водохранилища **первого типа** слабо заиляемые. Здесь, в основном, нанос оседает в самых глубоких местах водохранилища – у плотины: это Ткибульское, Шаорское, Храмское, Сионское и Тбилисское водохранилища (рис. V.2.27). Водохранилища **второго типа** это – Жинвальское и Ладжанурское водохранилища (рис. V.2.28, табл. V.2.4.).

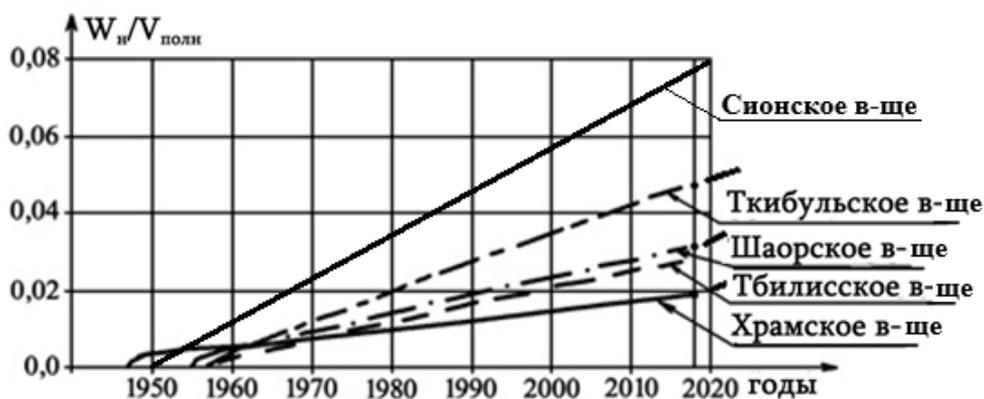


Рис. V.2.27. Графики заиления водохранилищ первого типа (Ткибульское, Шаорское, Тбилисское, Храмское, Сионское) (к 2022 г.)

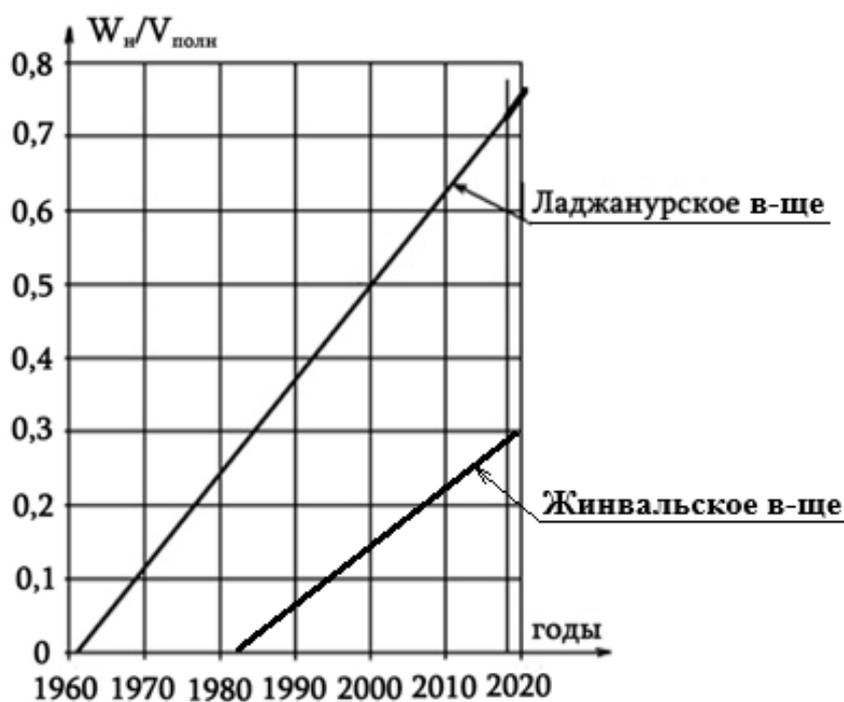


Рис. V.2.28. График заиления водохранилищ второго типа (Ладжанурское, Жинвальское, к 2022 г.)

Основные показатели седиментационных показателей на дне водохранилищ Грузии

(к 2022 г.)

№	Водохранилище	Год ввода в эксплуатацию	Полный объем водохранилища ($V_{полн}$), млн м ³	Мертвый объем, ($V_{мерт}$), млн м ³	Полезный объем водохранилища ($V_{полез}$), млн м ³	$V_{полн}/L$, км	Высота плотин, м	Тип плотины	Отметка НПУ водохранилища, м	Длина водохранилища (L) и ширина (B), км	Максимальная глубина, H, м	Площадь зеркала водохранилища на НПУ, F, км ²	Накопление наносов в среднем за год, $W_{н/г}$, млн м ³ /год	Количество наносов за 2022 год $W_{н}$, млн м ³	$W_{н}/V_{полн}$	Высота наносов у плотины, м	Тип водохранилища по заилению	Прогнозная формула объема накопления наносов за расчетный год (t), млн м ³	Показатели заиления по типу водохранилища
1	Храмское	1947	312,0	20,0	292,0	9,17	32,0	Каменно-набросная	1512,0	14,0/3,5	25,0	34,0	0,092	6,6	0,023	7,0	I	$0,092(t-1947)$	первый, $W_{н}/V_{полн} < 0$,
2	Тбилисское	1956	215,0	60,0	155,0	26,10	9,0 15,0 10,0 12,0	2 - бетонные 2 - земляные	548,0	9,0/2,0	45,0	11,8	0,18	9,6	0,031	4,3	I	$3,23+0,18(t-1970)$	первый, $W_{н}/V_{полн} < 0$,
3	Шаорское	1955	90,0	3,0	87,0	5,17	14,0	Каменно-набросная	1132,0	7,5/3,0	12,3	13,2	0,05	3,1	0,035	2,5	I	$0,05(t-1955)$	первый, $W_{н}/V_{полн} < 0$,
4	Жинвальское	1985	520,0	150,0	370,0	45,20	102,0	Каменно-земляная	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	8,1	126,0	0,215	23,0	II	$65+8,1(t-2010)$	второй, $W_{н}/V_{полн} > 0$,
5	Снонское	1963	325,0	25,0	300,0	28,50	86,0	Земляная	1068,0	11,5/2,0	68,0	11,4	0,45	26,0	0,081	20,0	I	$0,45(t-1963)$	первый, $W_{н}/V_{полн} < 0$,
6	Ладжанурское	1961	24,6	7,0	17,6	17,1	70,0	Бетонная	494,0	3,2/0,45	67,8	1,4	0,32	18,6	0,75	45,0	II	$0,32(t-1961)$	второй, $W_{н}/V_{полн} > 0$,
7	Тхибульское	1956	84,0	22,0	61,0	7,3	36,0	Земляная	522,5	6,0/3,7	32,0	11,5	0,063	3,95	0,057	14,0	I	$0,063(t-1956)$	первый, $W_{н}/V_{полн} < 0$,

VI. АБРАЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА БЕРЕГАХ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

VI.1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БЕРЕГАХ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Абразионные процессы на берегах водохранилищ представляют собой многофакторный процесс. Приоритет этих исследований принадлежит академику Ф.П. Саваренскому. Все существующие исследования можно разделить на четыре этапа (рис. VI.1.1):

- **первый этап** исследований (до 1950 г.) характеризуется, в основном, геологическими обоснованиями [Саваренский Ф.П., Поляков Б.В., Ширямов В.А.] и др.;
- **второй этап** исследований (до 1960 г.) характеризуется развитием различных методов прогнозирования. Основные зависимости, созданные в этот период, используются до сих пор [Вендров С.Л., 1962; Золотарев Г.С., 1956; Качугин Е.Г., 1975; Кондратьев Н.Е., 1960; Пышкин Б.А., 1973; Розовский Л.Б., 1968; Ian S.K., Singh V.P., 2003] и др.;
- **третий этап** исследований (до 1975 г.) характеризуется обработкой теории динамики берегов и данных полевых наблюдений [Варазашвили Н.Г., Григорьева О.Г., Максимчук В.Л., Печеркин И.А., Судольский А.С., Финаров Д.П., Широков В.И.; Sorokina O.R., Petrova L.E.] и др.; на этом этапе началось изучение берегов горных водохранилищ;
- **четвертый этап** исследований характеризуется использованием отдельных факторов на горных водохранилищах: нестационарный уровеньный режим, факторный анализ региональных особенностей [Burova V.N., 2020; Reid I.R., 1992; Metreveli G. и др., 2019; Starodubtsev V., Bogdanets V., 2016; Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н. 2002]. Прогноз переработки берегов **горных водохранилищ** выполнен для определенной группы водохранилищ, который впервые был разработан доктором технических наук, профессором Нино Варазашвили (табл. VI.1.1; табл. VI.1.2).

Таблица VI.1.1

Прогнозные группы водохранилищ

№	Группа водохранилищ	Амплитуда сработки уровня воды (А), м	Скорость перемещения уровня воды ($V_{ур}$), м/сут	Морфометрический показатель, H^2/F	Показатель рельефа (средний) «а»
1	Квазистабильные (равнинные)	< 6	<0,03	$8 \cdot 10^{-9} \div 3 \cdot 10^{-7}$	0,84
2	Нестабильные (горные)	6 ÷ 20	0,03 ÷ 0,08	$3 \cdot 10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-5}$	0,57
3	Со средней сработкой уровня (горные)	20 ÷ 50	0,08 ÷ 0,50	$3 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-4}$	0,36
4	С быстрой сработкой уровня (высокогорные)	50 ÷ 100	0,50 ÷ 1,50	$3 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-3}$	0,27
5	С интенсивной сработкой уровня	> 100	>1,50	$< 8 \cdot 10^{-3}$	0,12

¹⁾ $\alpha = \lg V_{полн} / \lg H = \operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона прямых; $\lg K_w$ – отрезок на оси ($\lg V_{полн}$) (рис. III.2.1). Величина коэффициента горности местности («а») зависит от объема водохранилища ($V_{полн}$), коэффициента объема (K_w), площади (F) и глубины (H), $V_{ср} = K_w \cdot H^2$ (рис. III.2.1).

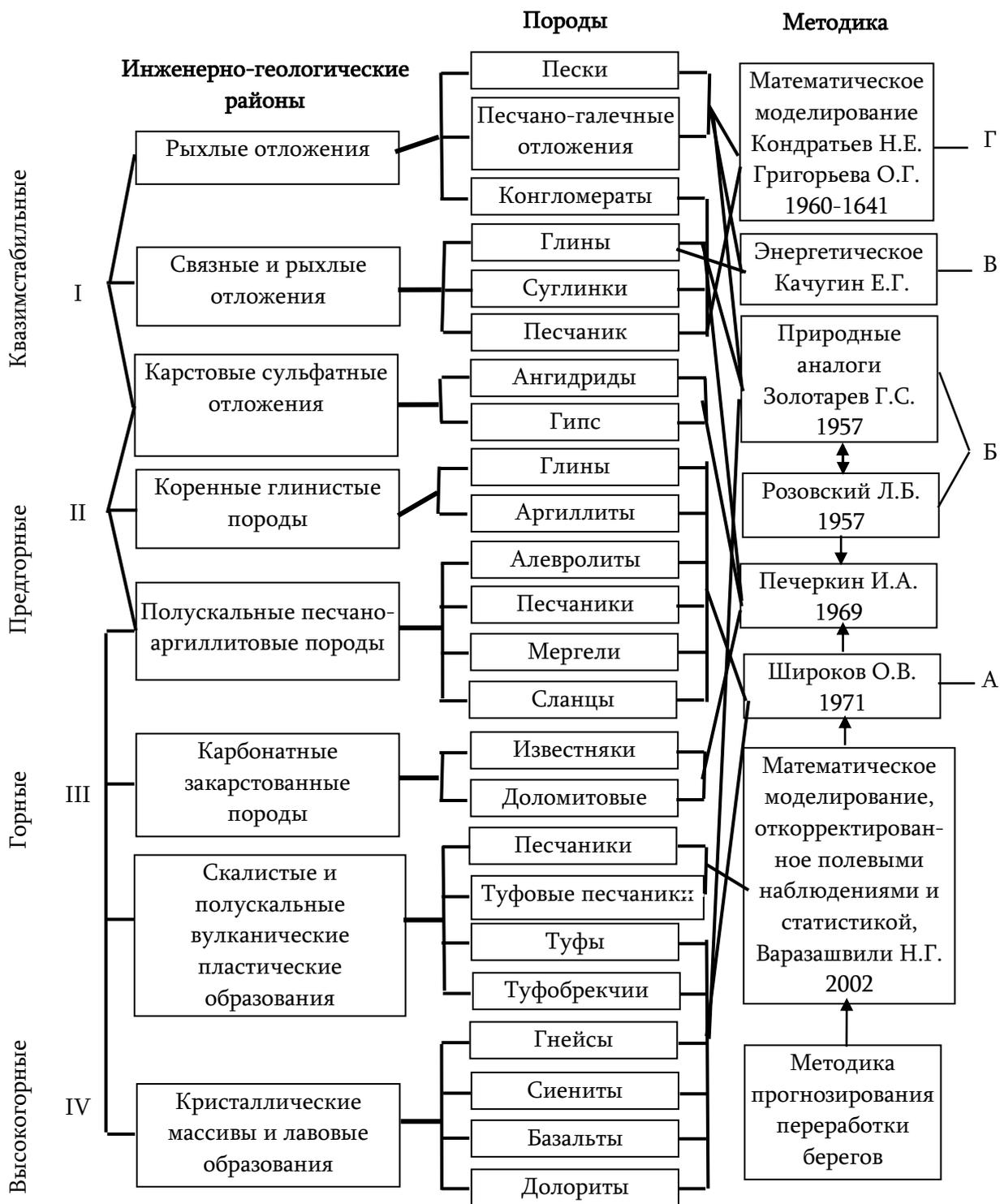


Рис. VI.1.1. Основные существующие методы прогноза переработки берегов водохранилищ

Условные обозначения: I – квазистабильные, $A < 5$ м; $V_{ур.} < 0,03$ м/сут, равнинные водохранилища;

II – с неустойчивой сработкой уровня, $A = 5 \div 20$ м; $V_{ур.} = 0,03 \div 0,08$ м/сут, предгорные водохранилища; III – средней сработки уровня $A = 20 \div 50$ м;

$V_{ур.} = 0,08 \div 0,5$ м/сут, горные водохранилища; IV – уровень с быстрой сработкой $A = 50 \div 100$ м;

$V_{ур.} = 0,5 \div 3,5$ м/сут, высокогорные водохранилища; А – с корректировкой математических моделей, натурных наблюдений и статистических данных; Б – природными аналогами; В – энергетические; Г – математические модели.

Основные генетические типы берегов горных водохранилищ

Типы берегов	Генетические типы берегов	Генетические подтипы берегов	Виды берегов
1	2	3	4
I	Гидрогравитационные берега	Денудационные (выровненные)	Слабо денудационные
			Сильно денудационные
		Оползневые	Дитрузивные (блоковые)
			Пластичные
			Оползни – потоки
		Лавинно-осыпные	
		Суффозионно-просадочные	
Карстовые	Коренные		
	Просадочные		
II	Абразионные берега	Денудационные (коренные)	Слабо размываемые
			Средне размываемые
			Сильно размываемые
		Размываемые (связные)	Поверхностного смыва
			Слабо размываемые
			Средне размываемые
			Интенсивно размываемые
II	Абразионные берега	Обвально-осыпные	Глыбовые
			Просадочные
		Оползневые	Постоянно действующие
			Периодически действующие
		Карстовые	
III	Аккумулятивные берега	Талассогенные	Пляжевые
		Делювиальные	Осушки
IV	Нейтральные берега	Приглубые	–
		Отмелые	–
V	Лагунные берега	Лагунные	–
VI	Заболоченные берега	Поверхностные	Травянистые
			Грунтовые
		Глубоко заболоченные	Кустарниковые

VI.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БЕРЕГАХ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ ГРУЗИИ

Методика прогнозирования формирования береговой линии горных водохранилищ основана на: инженерно-геологическом районировании; анализе геологической ситуации; генетической классификации прибрежных склонов; колебании уровня и режима ветрового волнения [Варазашвили Н. Г., Гобечия Г. Н., 2002].

Процессы формирования берегов горных водохранилищ начинаются с их заполнением. При расчете абразионных процессов водохранилищ необходимо определить верхнюю (a_1) и нижнюю (a_2) границы размывов, уклон и ширину берегов.

На основании наших исследований выявлено, что основными факторами, влияющими на переработку берегов **горного водохранилища**, являются: ветрово-волновой режим, сработка уровня, конфигурация береговой линии, уклон склона и тип грунта. Исследования переработки берегов были проведены для всех конкретных участках берегов.

Динамика и прогноз эрозионных процессов водохранилищ проводились на берегах крупных горных водохранилищ Грузии – Жинвальском, Сионском, Тбилисском, Храмском, Шаорском, Ткибульском и Ладжанурском (рис. VI.2.1÷VI.2.7; табл. VI.2.1 ÷VI.2.11) [Jordanishvili I., Iremashvili I., Iordanishvili K., Bilanishvili L., Potskhveria D., Kandelaki N., Sukhishvili N., 2017; Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В., 2018; Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Поцхверия Д. Ш., Биланишвили Л.Б., 2018].

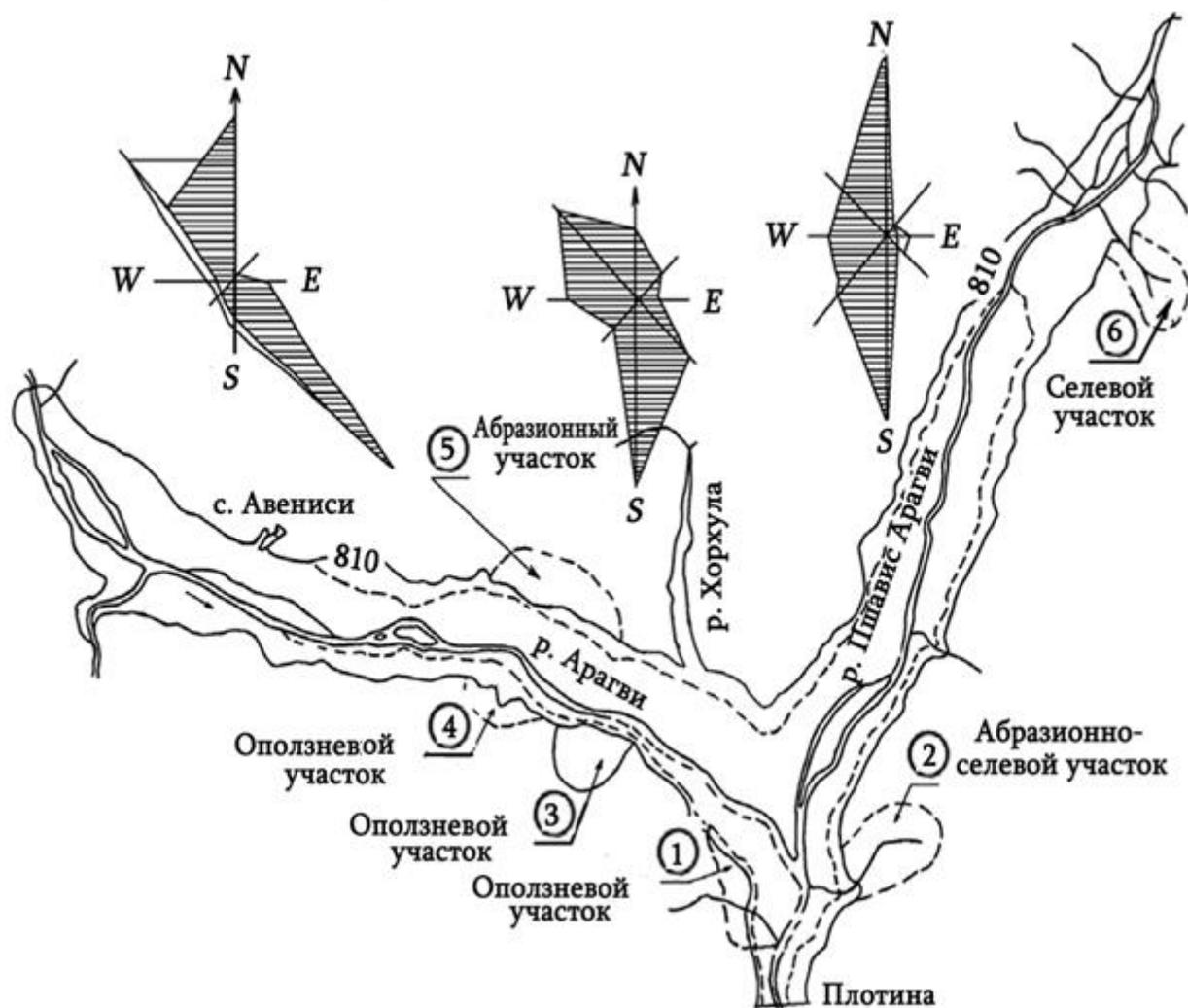


Рис. VI.2.1. Схема абразионно-селевых участков периметра Жинвальского водохранилища

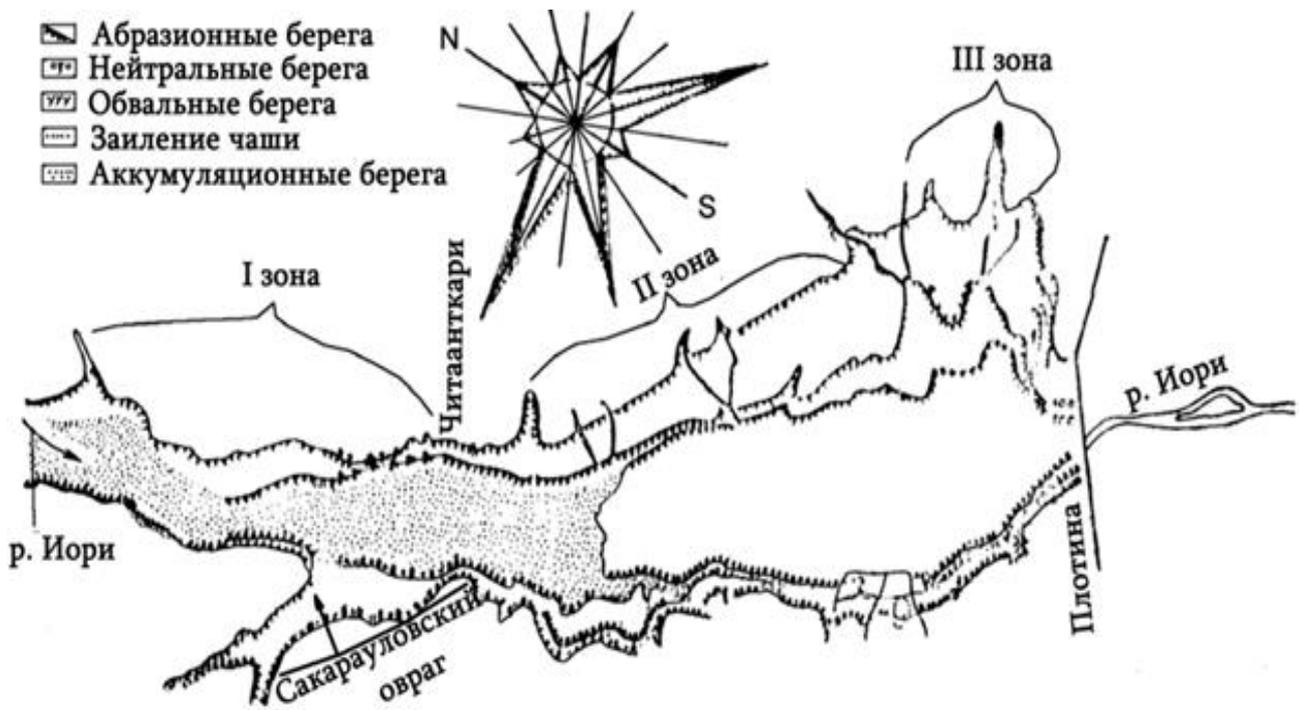


Рис. VI.2.2. Схема развития абразионных процессов на берегах Сионского водохранилища



Рис. VI.2.3. Схема развития абразионных процессов на берегах Тбилисского водохранилища
 — абразионные берега; - - - аккумулятивные берега

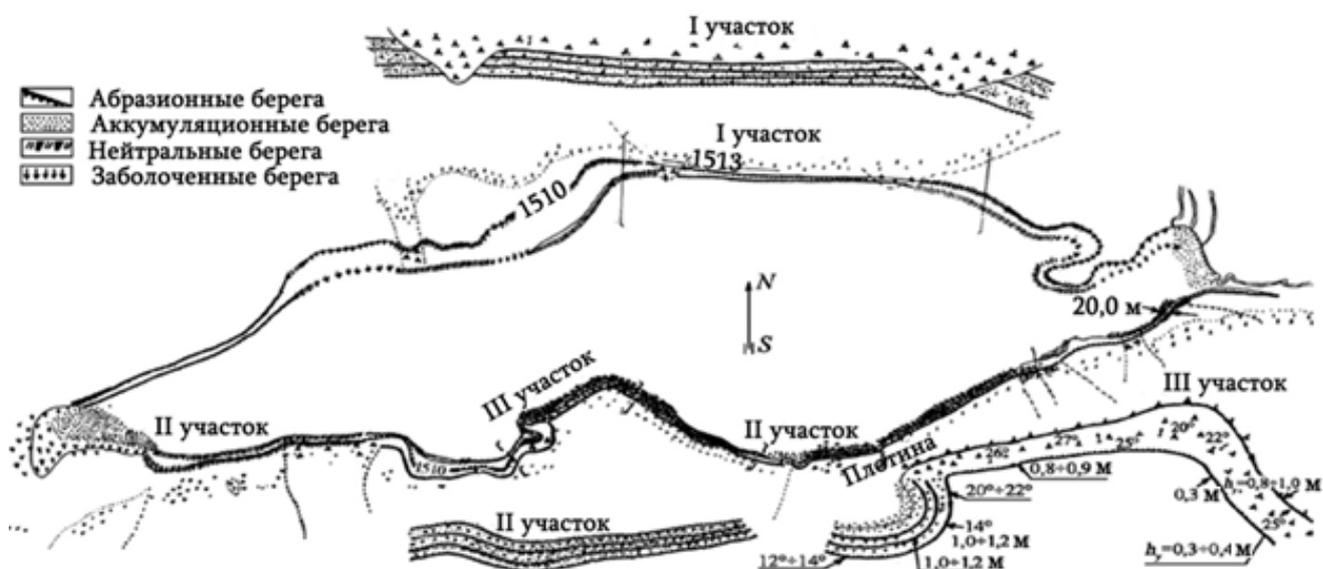


Рис. VI.2.4. Схема развития абразионных процессов на берегах Храмовского водохранилища



Рис. VI.2.5. Схема развития абразионных процессов на берегах Шаорского водохранилища

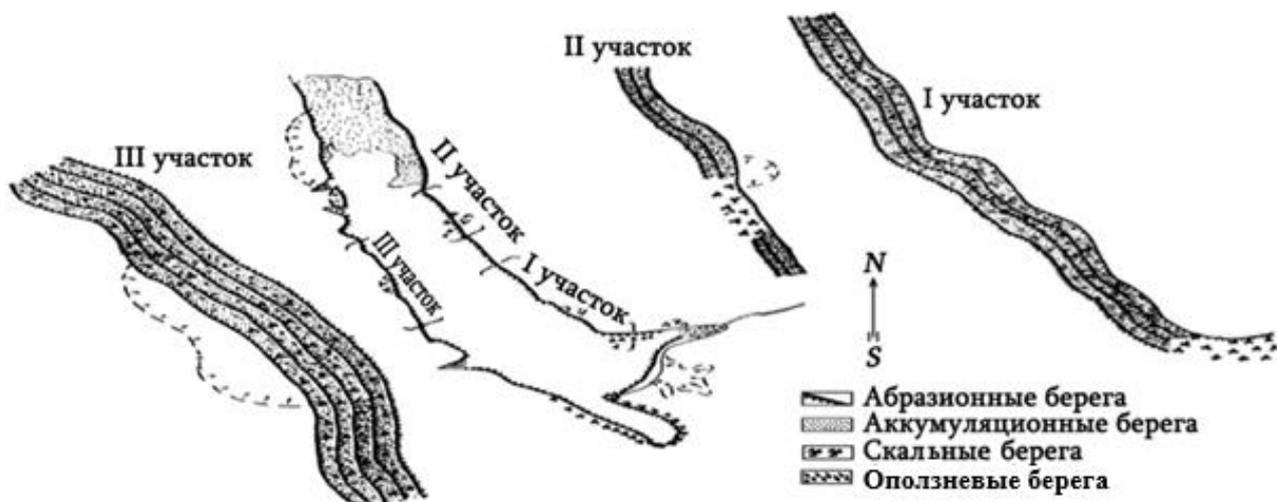


Рис. VI.2.6. Схема развития абразионных процессов на берегах Ладжанурского водохранилища



Рис. VI.2.7. Схема развития абразионных процессов на берегах Ткибульского водохранилища

Таблица VI.2.1

Краткая характеристика берегов Тбилисского водохранилища (✚ 545,0 м)

Индекс	Генетические типы берегов	Длина, км	Вид берегов	Современные геологические процессы	Литология	Средний уклон берега в градусах	Толщина переработки, м	Месторасположение берегов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Абразионный	19,8 (83%)				—		
	Денудационно-абразионный	1,0 (4,2%)	а) Слабо переработанный	Истощение	Аркозовый, плотный песчаник	30-65°	—	Юго-восточный берег озера Авлабари
	Выпрямленный	4,51 (18,9%)	б) Сильно переработанный	Истощение Абразия	Песчаник, алевролит, глина	10-20°	1-3	Юго-восточное и юго-западное побережье
	Абразионный	6,37 (26,7%)	а) Слегка размытый	Абразия	Глина	5-6°	0,2-0,3	У озера Авлабари
		1,83 (7,7%)	б) Средне-размытый	Абразия	Тяжелая глина, песчаник,	6-11°	0,5-2,0	Юго-восток, I участок
	Абразионный	3,13 (13,3%)	в) Сильно переработанный	Абразия	Алевролиты, глина	10-16°	2-4	Северо-восточный берег
Осыпной	2,91 (12,2%)	—	Абразия	Песчаник	25-50°	1-2	Северо-западный и южный берега	
II	Аккумуляционный	0,8 (3,3%)	Мелководье	Аккумуляция	Гравийный песчаник	1-5°	0,3	Локальные участки в начале бухты
III	Нейтральный	3,3 (13,7%)	— „ —	—	Аллювий	1-5°	—	У р. Квинисхеви и озера Авлабари

Таблица VI.2.2

Краткая характеристика берегов Храмского водохранилища († 1506,0 м)

Индекс	Генетические типы берегов	Длина, км	Вид берегов	Современные геологические процессы	Литология	Средний уклон берега в градусах	Толщина переработки, м	Месторасположение берегов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Абразионный	14,5 (52%)						
	Абразионный	0,7 (2,6%)	Слабо переработанный	Абразия	Долериты	5°-10°	0,2-0,3	Юго-восточный берег выше с. Цинцкаро
	Скалистый	1,5 (5,4%)	Среднепереработанный	—	Андезитобазальт	10°-15°	0,2-0,3	Юго-запад
		1,2 (4,3%)	Сильно переработанный	—	Долериты	20-30°	5,0-6,0	У плотины
	Абразионный, вязкий	1,2 (4,3%)	Поверхностно смываемый	Смываемый	Песчаник	5°-9°	0,1-0,2	Юго-запад, север
		2,0 (7,2%)	Слабо размытый	Абразионный	Суглинок, аллувион	10°-16°	0,3-0,5	Юго-запад, север
		2,8 (10,0%)	Средне-размытый	—	—	18°-25°	0,5-3,0	Юг, северо-запад
		3,2 (11,5%)	Интенсивно размытый	—	—	60°-80°	3,0-12,0	Юго-восток
	Лавинный	1,0 (3,5%)	Овражный	Лавинный, овражнока-навочный, абразионный	Связный суглинок	60°-70°	2,5-5,0	Юго-восток
	Оползневой	0,9 (3,2%)	Террасовый	Оползень, Абразия	Делювиальная глина	36°-45°	1,0-3,0	Юго-восток
Аккумуляционный	3,4 (12,0%)							
Волново-кумулятивный	0,40 (1,5%)	Пляжевый	Аккумуляция	Гравий, галька	2,0°-4,0°	0,5-0,7	Юго-запад, юг	
Аллювиально-аккумуляционный	3,0 (10,5%)	Илистый	Аккумуляция	Аллювиальные отложения	<2°	0,6-0,8	У слияния рек	
Лагунный	2,8 (10%)	Пологий	—	Осаждение наносов	<2°	—	Юго-запад, север	
III	Нейтральный	6,0 (21%)	Бульжниковый		Суглинки, песок	2°-5°	—	Юго-запад, северо-восток
IV	Болотистый	1,6(5%)	Низкий		Глина, ил	1°	—	К северо-востоку

Таблица VI.2.3

Краткая характеристика берегов Шаорского водохранилища (±1132,0 м)

Индекс	Генетические типы берегов	Длина, км	Вид берегов	Современные геологические процессы	Литология	Средний уклон берега в градусах	Толщина переработки, м	Месторасположение берегов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Абразионный	21 (74,6%)						
	Абразионно-размываемые	3,0 (10,6%)	Плохо переработанный	Абразия	Суглинок, аллювиальный гравий	5°-8°	0,3-0,5	Север, северо-запад
		4,1 (14,6%)	Среднепереработанный	—	Делювиально-глинистый, аллювиально-галечные	8°-20°	1,0÷2,0	Юго-восток, северо-запад, к северо-востоку
		6,2 (22,1%)	Сильно переработанный	—	—	>20°	2,0÷4,0	Северо-запад
	Лавинные	0,6 (2,1%)	Крутой подводный	Абразия, осыпь	Глина	40°-50°	3,0-5,0	Юго-запад.
	Оползневые	0,2 (0,7%)	Подводный	Оползнево-абразионный	Глина	>25°	1,0-2,0	Юго-восток
	Карстовый	6,9 (24,5%)	Подводный	Карст, абразия	Известняк, мергель	25°-45°	0,5÷2,0	Юго-восток, северо-запад
II	Аккумуляционный	1,2 (4,2%)						
	Волново-аккумулятивный	0,7 (2,5%)	Пляжевый	Аккумуляция	Гравийный (d=0,5-3,02 см)	2°-4°	0,5÷0,7	К Северо-востоку
	Аллювиально-аккумулятивный	0,5(1,7%)	Пологий	—	Илисто-песчаный	2°-4°	0,6-1,0	В устье р. Шаори
III	Нейтральный	1,9 (6,6%)						
	Основной	1,1 (3,8%)	Крутой подводный		Известняк	>45°		К Северо-востоку, юго-восток
	Четвертичные отложения	0,8 (2,8%)	Низкий		Глина	1°-3°		Юго-восток

1	2	3	4	5	6	7	8	9
IV	Болотистый	3,4 (12,2%)						
	Осыпной	2,1 (7,5%)	Низкий		Глинистый суглинист ый	1°-1,5° <3°		Северо- восток, юго-восток
	Болотистый	1,3 (4,7%)	Средний		Илистый			р. Тетри- чала к северо- востоку

Таблица VI.2.4

Краткая характеристика берегов Ладжанурского водохранилища (±496,0 м)

Индекс	Генетические типы берегов	Длина, км	Вид берегов	Современные геологические процессы	Литология	Средний уклон берега в градусах	Толщина переработки, м	Месторасположение берегов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Абразионный	6,78 (80,2%)						
	Абразионный (основные отложения)	0,55 (6,5%)	Среднеразмываемый	Абразия истощение	Песчаник, мергель	25°-55°	0,3-0,6	Каньоны по обоим берегам
	Абразионно-размывающиеся (четвертичные отложения)	2,77 (17,1%)	Слабо размываемый	Абразия	Глина, аллювиально-пролювиальные отложения	7°-15°	0,4-0,6	Верхняя и средняя часть правого берега
	Оползневой	3,45 (4,0%)	Среднеразмываемый			>20°	2,0÷4,0	Северо-запад
	Коренные отложения, оползневые	2,8 (33%)	С крутыми ступенями	Оползни, абразия	Глинистые породы	25°-45°	1,0-3,0	Восточный правый берег
	Четвертичные отложения	0,65 (7,8%)	—	—	Делювиальная глина	25°-30°	1<2,0	Восточный берег
II	Аккумулятивные	1,18 (13,9%)	—	—				
	Аллювиально-аккумулятивные	0,7(8,3)	Илистый	Аккумулятивный	Аккумулятивный осадок	<2°	1,5÷1,7	У истока
	Аллювиально-аккумулятивные	0,48(5,6%)	Рыхлое осаждение	—	—	2°-3°	<1,2	Территория плотины
III	Нейтральный	0,6 (5,9%)	Скалистый крутой		Известняк, песчаник		25°-60°	Каньонная часть правого берега

Таблица VI.2.5

Краткая характеристика берегов Ткибульского водохранилища (±520,0 м)

Индекс	Генетические типы берегов	Длина, км	Тип берегов	Современные геологические процессы	Литология	Средний уклон берега в градусах	Толщина обработки, м	Расположение берегов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Абразионный	22,0 (52,6%)						
		2,0 (4,9%)	Слабо размываемый	Выветренный размыв	Песчаник, известняк	45°	0,20-0,4	Северный и северо-западный «малый» остров
	Абразионно-размывающий, связные грунты	3,07 (7,3%)	Слабо размываемый	Смыв абразия	Аллювиально-делювиальные, песчано-глинистые	10°-16°	0,3-0,5	Юг и Запад, север и восток
		6,4 (15,6%)	Средне размываемый	Абразия		17°-25°	1,0÷1,2	Юго-восточный и южный берег
		5,9 (14,5%)	Легко размываемый	Лавина, осыпь, абразия	Делювиальная глина	25°-40°	>1,2	Юго-восточный и южный берег
Лавинно-осыпной	1,8 (4,5%)	Высокий	Лавина, осыпь, абразия	Делювиальная глина	45°-55°	2,0	Западный берег часть юга	
II	Оползневой	0,5 (1,2%)	Террасовый	Оползни, абразия	Делювиальная глина	25°-30°	3,5-5,0	Западный и южный берег
	Аккумулятивный	5,0 (11,8%)						
	Волново-аккумулятивный	1,5 (3,5%)		Аккумуляция, размыв	Нанос	2°-4°	0,4÷0,8	Южный берег, часть восточного
	Аллювиально-аккумулятивные	3,5 (8,3%)		Аккумуляция	Гравийные отложения	1°	2,0-4,0	Устье р. Ткибула
III	Нейтральный	9,1 (23,8%)		Низкий	Гравийно-глинистые и суглинистые отложения	2°-5°		Участки восточного берега и исток бухт
IV	Болотистый	5,0 (11,8%)		Очень низкий	Аллювиально-пролювиальные суглинки	1÷1.5°		Восточный и западный берега

Таблица VI.2.6

**Сводные показатели генетических типов берегов
Тбилисского водохранилища (±545,0 м)**

Тип берега	Длина берега, км
Общая длина берега	23,9
I. Абразионный	19,8
II. Аккумуляционный	0,8
III. Нейтральный	3,3

Таблица VI.2.7

Сводные данные генетических типов берегов Храмского водохранилища

Тип берега	Длина, км на уровне ± 1512,0 м		Длина, км на уровне ± 1497,0 м	
	км	%	км	%
Общая длина берега	31,0	100,0	28,0	100,0
I. Абразионный	15,8	51,0	14,2	51,0
II. Аккумуляционный	1,2	3,8	3,4	12,0
III. Нейтральный	7,0	22,6	6,0	21,5
IV. Лагунный или болотистый	– 7,0	– 22,6	1,6 2,8	5,5 10,0

Таблица VI.2.8

Сводные данные генетических типов берегов Шаорского водохранилища (±1132,0 м)

Тип берега	Длина берега, км
Общая длина берега	27,5
I. Абразионный	21,0
II. Аккумуляционный	1,2
III. Нейтральный	1,9
IV. Болотистый	3,4

Таблица VI.2.9

Сводные данные генетических типов берегов Ладжанурского водохранилища (±496,0 м)

Тип берега	Длина берега, км
Общая длина берега	27,5
I. Абразионный	6,98
II. Аккумуляционный	1,18
III. Нейтральный	0,6

Таблица VI.2.10

Сводные данные генетических типов берегов Ткибульского водохранилища (±496,0 м)

Тип берега	Длина берега, км
I. Абразионный	22,0
II. Аккумуляционный	5,0
III. Нейтральный	9,0
IV. Болотистый	5,0

**Основные обобщенные параметры переработки берегов горных водохранилищ
в течении 10 лет
(при равномерной сработке уровня до 25 м)**

Генетический тип берега	Подтип берега	Виды берегов	Характеристика грунтов в зоне сработки уровня	Первоначальные параметры профиля берега		Параметры прогнозного профиля берега				
				Высота берега, м	Уклон откоса, в градусах	Перемещение уступа склона, м	Наклон (в градусах) В зоне сработки уровня воды В зоне наката волны		Объем размыва, м ³ /л.м.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
П равитапционно-денудационный	Денудационно-истощенные берега	Слабо денудационный (оголенные) Сильно денудационный	Долериты четвертичного периода, сильно трещиноватые Ан дезиты-базальты, сильно трещиноватые, Плиоценовые Алевриты и трещиноватые известняки Мелового и Третичного периодов Тонкослойстая глина	<60,0	25-75	1,0	20-70	-	-	
				5-10	30-65	2,0	30-65	-	-	
	Денудационно-истощенные берега			Среднеслойстые алевриты и алевриты Эоценового периода Флишевидные отложения Верхнего Эоцена	30-60	35-40	2,6	20-40	-	0,50
					20-40	25-50	3,0	7-10	12-18	2,30
	Оползневой		Детрозионный (блочный) Распадающийся (пластинчатый) Оползневые потоки	Делювиальные глинистые грунты, Верхнечетвертичного периода Шлак, глина (майкол) Озерно-речные пролювиальные глинистые почвы Среднего и Верхнего Четвертичного периода	15-30	10-20	10-18	6-9	8-14	16,50
					10-20	12-25	10-30	5-8	6-10	38,0
	Оползневой				15-50	20-40	20-28	5-9	6-10	101,0
					10-25	18-35	18-25	5-6	10-12	72,5
					8-20	20-25	Скорость движения кромки склона 3 м/год			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Гравитационно-денудационные	Оползневые	Мелкофракционные	Тонкофракционные глинистые отложения Среднечетвертичного периода	15-20	20-60	15-20	12-15	13-18	61,5
		Крупнофракционные	Флишевые отложения (алевролиты и тонкослоистые глины, Верхний Эоцен)	12-20	10-18	12-25	8-12	8-15	35,6
		Карстовые	Барем (слабый мергель известняка)	2-5	>25	<0,3	-	-	-
		Суффозионные	Загипсованный глинистый	10-25	8-25	30-42	6-10	7-13	21,4
		Слабо переработанные	Лавовые отложения Четвертичного периода	<50	20-70	<0,4	20-70		3,20
		Средне переработанные	Андезиты сильно трещиноватые	5-10	37-70	<0,3	30-60		0,6
		Сильно переработанные	Трещиноватый песчаник, Эоценовый период	30-50	28-40	0,6	15-25	20-40	3,70
		Поверхность смыва	Глинистый песчаник, Эоценовый период	20-40	15-40	0,9	8-10	9-15	7,60
		Слабо размытые	Глинистые, грунтовые и галечные отложения	3	6-9	2-3	3-5	5-8	38,0
		Средне размытые	Глина, галька	3-5	10-16	3-10	6-10	11-13	9,5
Абразионные	Абразионные	Средне размытые	Делювиально-глинистый грунт	15-50	20-40	10-20	10-13	12-30	53,0
		Интенсивно размывающиеся	Конгломераты	5-20	10-20	50	6-10	8-16	105,0
			Рыхлые отложения	5-18	6-18	80-110	3-8	4-10	479,0
			Аллювиальные отложения	15-45	20-40	20-30	8-10	10-13	116,5
			Озерно-речные глинисто-каменные, Среднечетвертичного периода	10-20	20-25	40-55	7-13	10-15	197,0
			Флишевые отложения	12-23	15-28	<10	5-10	8-15	135,0
			Верхнеэоценового периода	15-20	5-15	<16	3-11	6-13	289,0
			Глина	10-40	15-45	50-20	3-6	8-10	120,0
			Делювиальная глина	10-30	18-35	<35	10-18	10-20	78,0
			Шлак (майкопского типа)	10-45	20-40	30-60	5-9	10-15	200-380
Оползневые	Периодически действующие	Постоянно действующие	Делювиальные глины, Средний и Верхний Четвертичный период.	10-45	20-40	30-60	5-9	10-15	200-380
		Периодически действующие	Делювиальные глины, Средний и Верхний Четвертичный период.	10-45	20-40	30-60	5-9	10-15	200-380

VI.3. ПРОГНОЗ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БЕРЕГАХ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

VI.3.1. РАСЧЕТ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ РАЗМЫВА АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Основные водохранилища в Грузии были возведены в середине прошлого века.

Одна из первых грузинских исследователей, доктор технических наук, профессор **Нино Варазашвили** выявила особенности горных водохранилищ (табл.VI.3.1) [Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н., 2002].

Таблица VI.3.1

Морфометрические числовые показатели основных типов водохранилищ

№	Основные показатели	Обозначения	Размерность	Количественные показатели		
				Равнинные водохранилища	Предгорные водохранилища	Горные водохранилища
1	2	3	4	5	6	7
1	Степень горности рельефа	a	–	1,0÷0,6	0,6÷0,29	0,29÷0,1
2	Морфометрический показатель	H^2/F	–	$9 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$
3	Амплитуда колебаний уровня воды	ΔA	м	<6,0	6÷20	>20
4	Показатель использования воды по объему	$V_{\text{полн}}/V_{\text{полез}}$	–	0,4÷0,6	0,5÷0,7	0÷0,95
5	Приращение объема воды на 1 м напора	$V_{\text{полез}}/H$	млн м ³ /м	500÷2000	50÷500	1,0÷50,0
6	Отношение объема воды к площади поверхности водохранилища	$V_{\text{полез}}/F$	млн м ³ /км ²	5÷15	15÷50	50÷120
7	Соотношение площади затопления и полезного объема воды	$S_{\text{зат}}/V_{\text{полез}}$	км ² /млн м ³	150÷120	110÷50	46÷25
8	Площадь затопления при напоре 1 м	$S_{\text{зат}}/H$	км ² /м	250÷65	55÷30	0,25÷0,08
9	Процент площади зеркала воды на мелководье к площади при НПУ	$F_{\text{мел}}/F_{\text{общ}}$	%	20÷15	10÷6	6-4
10	$A_b=f(a)$	A_b	–	0,010	0,014	0,016÷0,018

Для склонов, сложенных несвязными, связными, полускальными и скальными грунтами, разработаны методы прогнозирования размыва абразионных берегов (табл. VI.1.I) [Jordanishvili I., Iremashvili I., Jordanishvili K., Bilanishvili L., Potskhveria D., Kandelaki N., Sukhishvili N., 2017].

Если принять во внимание, что размыв абразионных берегов горных водохранилищ зависит от следующих факторов: **волновой энергии** у берега, **уровенного режима**, способности размыва склоновых **грунтов** и скорости этого процесса, то можно выделить два основных расчетных положения – 1) при перемещении уровня водохранилища до 6,0 м и 2) при перемещении уровня водохранилища более 6,0 м.

При расчете **первой позиции** принят энергетический метод прогнозирования размыва абразионного берега, при котором объем смытого грунта рассчитывается по следующей зависимости [Варазашвили Н.Г., Макацария А. П., 1974]:

$$Q = E \cdot K_{раз} \cdot K_{бер} \cdot t_r^b, \text{ м}^3 \quad (\text{VI.3.1})$$

где Q – объем грунта пород, смытых с 1 м длины берега, м^3 ; E – средне многолетняя энергия волнения на 1 м длины берега, т·м; $K_{раз}$ – коэффициент размыва горных пород, $\text{м}^3/\text{м}$; $K_{бер}$ – коэффициент, обусловленный высотой берега; t_r^b – время размыва действия (лет); значения $K_{раз}$ и $K_{бер}$ приведены в таблице VI.3.2; значение показателя степени (b) – равно $b = 0,45 \div 0,95$, $b_{ср} = 0,7$. Для крупных аллювиальных песков, смеси гравия и гальки – $b = 0,5$; для среднезернистых песков и гравия – $b = 0,6$; для аллювиальных мелкозернистых и пылеватых песков – $b = 0,8$; для легкого песка – $b = 0,9$.

Таблица VI.3.2

Значения ($K_{раз}$) и ($K_{бер}$)

№	Класс пород	$K_{раз}, \text{ м}^3/\text{м}$	$K_{бер}$
1	Сильно размываемые	0,0065÷0,003	0,03
2	Слабо размываемые (песок, глина, песчаник)	0,003÷0,001	0,035
3	Средне размываемые (тяжелая глина, озерная глина)	0,001÷0,0005	0,04
4	Неразмываемые (песчаник, морская глина)	<0,0005	0,05

Профиль смыва от верхней до нижней границы размыва намечается на инженерно-геологическом чертеже.

Расчетные горизонты: верхний – нормальный подпертый уровень (НПУ), нижний – уровень мертвого объема – (УМО). Основными элементами расчета являются: a_1 – **верхний предел** размыва и a_2 – **нижний предел** размыва; $m = \text{ctg} \alpha$ – котангенс осредненного угла установившегося берега.

Окончательный (интегральный) профиль размыва определяется в виде суммы отдельных изменений профиля.

Расчет **второй позиции** (смещение уровня при сработке более 6,0 м) осуществляется графоаналитическим методом. Окончательную ширину размыва берега (S), сложенного из однородных грунтов откоса, определяют по рис. VI.3.1.

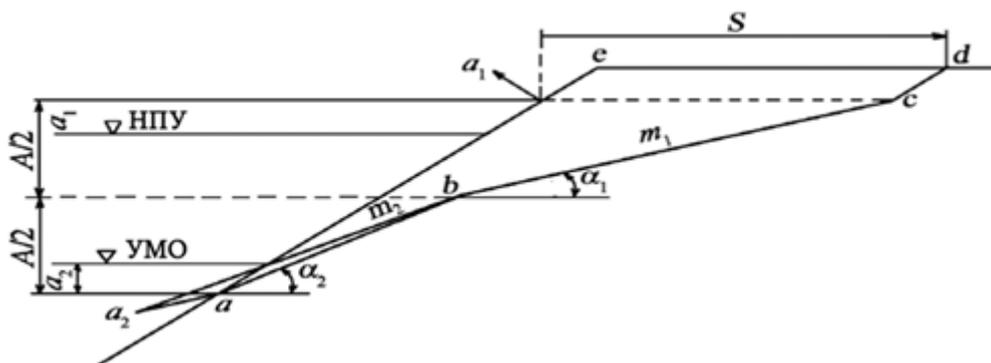


Рис. VI.3.1. Определение окончательной ширины размыва берега, сложенного из однородного грунта
 ae – поверхность естественного склона, $abcd$ – размывтая поверхность склона

Верхний предел размыва склона (a_1) зависит от высоты наката гребней волн на откос ($h_{\text{греб. волн}}$), волнового ($h_{\text{вол. наг.}}$) и ветрового ($h_{\text{вет. наг.}}$) нагонов на склоне:

$$a_1 = h_{\text{греб. волн}} + h_{\text{вол. наг.}} + h_{\text{вет. наг.}}, \text{ м}, \quad (\text{VI.3.2})$$

где $h_{\text{греб. волн}} = 1,1h_{1\%} \cdot K_{\text{шер}} \cdot K_{\text{греб}}$, м; $h_{\text{вол. наг.}} = 0,5h_{1\%}$, м; $h_{\text{вет. наг.}} = 0,001h_{1\%}$, м.

Величина ветрового нагона в условиях горных водохранилищ, в связи с малой протяженностью распространения волны ($D \leq 10,0$ км), равна $h_{\text{вет. наг.}} = 0,001h_{1\%}$, для практических расчетов его значением можно пренебречь; $h_{1\%}$, $\lambda_{1\%}$ (м) – высота и длина волн 1%-ой обеспеченности на "глубокой" воде. При отсутствии статистических данных $h_{1\%}$ рассчитывается по следующей зависимости – $h_{1\%} = \bar{h}_{\text{гл}} \cdot P_{1\%}$, где $\bar{h}_{\text{гл}} = A_b \cdot V_c^{1,2} D^{0,4}$ м; расчетные кривые $h_{\text{гл}} = f(A_b \cdot V_c \cdot D)$ приведены на рис. VI.3.2; $A_b = 0,010 \div 0,018$, значения которого приведены в таблице VI.3.1; V_c – скорость ветра, м/с; D – длина разгона волн, км; $P_{1\%} = 1,1$ – коэффициент, величина которого зависит от 1%-ой обеспеченности волнения; $K_{\text{греб}}$ – коэффициент, значение которого зависит от угла наклона берега к горизонту (α°), $K_{\text{греб}} = 1,2$ – при $\alpha^\circ = 6 \div 18$, $K_{\text{греб}} = 0,5$, при $\alpha^\circ = 3^\circ \div 5^\circ$, $K_{\text{греб}} > 2,0$, при $\alpha^\circ > 13^\circ$; $K_{\text{шер}}$ – коэффициент шероховатости откоса (табл. VI.3.3).

Таблица VI.3.3

Значения коэффициента шероховатости ($K_{\text{шер}}$) поверхности откоса

№	Тип укрепления откосов	Коэффициент шероховатости, $K_{\text{шер}}$	Значение коэффициента шероховатости по Gangillier-Cutter, n	Линейная шероховатость, ϵ
1	2	3	4	5
1	Бетонные плиты	0,95÷1,0	< 0,014	< 1,0
2	Глиняно-гравийный откос	0,90÷0,44	0,015÷0,020	1,0÷1,1
3	Насыпь из окатанных камней	0,76÷0,89	0,020÷0,025	1,1÷6,0
4	Насыпь из рваных камней	0,71÷0,75	0,025÷0,030	6,1÷50,0
5	Насыпь из бетонных блоков	0,5÷0,71	≥ 0,030	> 50,0

Пример расчета верхней границы размыва откосов (a_1) графоаналитическим методом приведен в таблице VI.3.5.

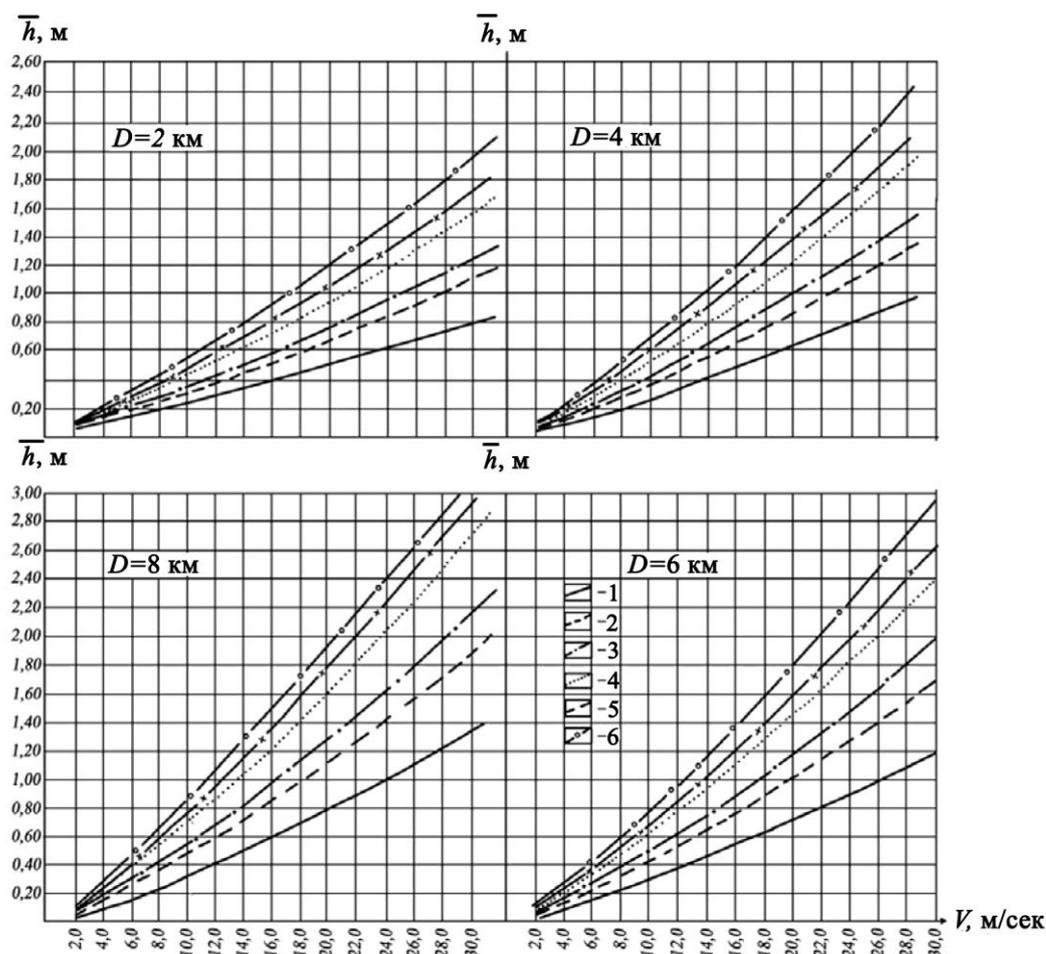


Рис. VI.3.2. Зависимость осредненной высоты волны ($\bar{h}_{гл}$), скорости (V_c), разгона волны (D) и (A_b), $\bar{h}_{гл} = f(A_b, V_c, D)$, где 1 – $A_b = 0,01$; 2 – $A_b = 0,014$; 3 – $A_b = 0,016$; 4 – $A_b = 0,020$; 5 – $A_b = 0,022$; 6 – $A_b = 0,025$.

VI.3.2. РАСЧЕТ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ РАЗМЫВА (a_2) АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Аналитический метод расчета нижней границы размыва абразионных берегов горных водохранилищ

Основой для расчета нижней границы размыва (a_2) берегов горных водохранилищ, сложенных **связным грунтом**, является равенство действующей расчетной ($V_{расч}$) и допустимой неразмывающей скоростей ($V_{доп.}$) водного потока:

$$V_{\text{расч}} = V_{\text{доп}}, \quad (VI.3.3)$$

где $V_{\text{доп}}$ – это допустимая неразмываемая скорость, ее значение определено по формуле предложенной академиком Ц.Е. Мирцхулава [Мирцхулава Ц. Е., 2000] для всех возможных факторов:

$$V_{\text{доп.}} = 1,25 \sqrt{\frac{2gm_p}{2,6\gamma_B n_u} (\gamma_{\text{гр.}} \gamma_B) d_{\text{ср.}} + 1,25 K_0 C_Y^H} \quad (VI.3.4)$$

$V_{\text{расч.}}$ – расчетная скорость водного потока, значение которой можно определить из теории волнового движения жидкостей, в частности по теории трохoidalных волн Герстнера (с учетом высоты волны – h , длины – λ и нижнего предела размыва a_2) [Gerstner F. I., 1809]:

$$V_{\text{расч}} = \frac{n_u \pi h}{\sqrt{\frac{\pi \lambda}{g} \cdot sh \frac{4\pi a_2}{\lambda}}}, \quad (VI.3.5)$$

где λ , h – длина и высота ветровой волны на поверхности водохранилища, м; γ_B , $\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес воды и грунта, кг/м³; n_u – коэффициент перегрузки, учитывающий пульсирующую величину скорости потока, определяемый по формуле [Мирцхулава Ц. Е., 2000]:

$$n_u = \left(\frac{V_{\text{max}}}{\bar{V}} \right)^2, \quad (VI.3.6)$$

где V_{max} – пульсирующая максимальная придонная скорость; \bar{V} – придонная средняя скорость; при отсутствии исследований $n_u = n = 4$; m_p – коэффициент условий работы частиц грунта, учитывающий влияние наносов в коллоидном состоянии, 0,1 кг/м³; $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр частиц почвы, мм; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; K_0 – коэффициент однородности связного грунта, определяемый по формуле $K_0 = d_{\text{ср}} / d_{95}$, где $d_{\text{ср}}$ – среднее значение диаметра грунта, d_{95} – диаметр частиц, количество которых менее 95 % от массы общей смеси; $C_Y^H = 0,035 \text{т/м}^2$ – нормативная усталостная прочность грунтов; C – расчетное значение связности грунтов.

Последовательность расчетов

Шаг 1: Приравниванием формул VI.3.4 и VI.3.5 ($V_{\text{расч}} = V_{\text{доп}}$) получаем:

$$1,25 \sqrt{\frac{2gm_p}{2,6\gamma_B n_u} (\gamma_{\text{гр.}} - \gamma_B) d_{\text{ср.}} + 1,25 K_0 C_Y^H} = \frac{0,75\pi h}{\sqrt{\frac{\pi \lambda}{g} \cdot sh \frac{4\pi a_2}{\lambda}}}, \quad (VI.3.7)$$

Шаг 2: Обе части уравнения (VI.3.7) возведем в квадрат

Шаг 3: После расчетов получим:

$$1,25^2 \left[\frac{2 \cdot 9,81 \cdot m_p}{2,6\gamma_B n_u} (\gamma_{\text{гр.}} - \gamma_B) d_{\text{ср.}} + 1,25 K_0 C_Y^H \right] = \frac{0,56 \cdot 9,86 h^2}{\frac{3,14 \lambda}{9,81} \cdot sh \frac{4 \cdot 3,14 \cdot a_2}{\lambda}}$$

отсюда: $11,77 \frac{m_p}{\gamma_B n_u} [(\gamma_{\text{гр.}} - \gamma_B) d_{\text{ср.}} + 1,25 K_0 C_Y^H] = 17,25 \frac{h^2}{\lambda \cdot sh \frac{12,56 a_2}{\lambda}}$,

затем: $sh \frac{12,56 a_2}{\lambda} = \frac{1,47 \gamma_B n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{\text{гр.}} - \gamma_B) d_{\text{ср.}} + 1,25 K_0 C_Y^H] \cdot \lambda}$

*) Равенство $V_{\text{расч.}} = V_{\text{доп}}$ определяется уравниванием теоретического расчетного значения скоростей, полученного в результате натурных исследований ($V_{\text{доп}}$).

Если учесть, что гиперболоидный синус равен $x = Sh\gamma$, откуда $\gamma = Arshx$, тогда $\frac{12,56a_2}{\lambda} = Arsh \frac{1,47\gamma_B n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{гр} - \gamma_B) d_{ср} + 1,25K_0 C_\lambda^Y]} \cdot \lambda$

Отсюда определяется значение нижней границы размыва (a_2) берега, сложенного связными грунтами, по формуле:

$$a_2 = 0,796 \cdot \lambda \cdot Arsh \frac{1,47\gamma_B n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{гр} - \gamma_B) d_{ср} + 1,25K_0 C_\lambda^Y]} \cdot \lambda \quad (VI.3.8)$$

Пример расчета аналитическим методом нижней границы размыва берегов водохранилищ

Удельный вес грунта – $\lambda_{гр} = 2600$ кг/м³; удельный вес воды – $\lambda_B = 1000$ кг/м³; коэффициент – $n_u = 0,4$; коэффициент условий работы – $m_p = 1,0$; коэффициент однородности связных грунтов – $K_0 = 0,4$; нормативная усталостная прочность связных грунтов – $C_\lambda^H = 0,035C$, где $C = 0,01 \div 0,06$. Для **крупных** связных грунтов ($d_{ср} = 0,000008$ м) будет:

$$a_2 = 0,796 \cdot \lambda \cdot Arsh \frac{1,47\gamma_B n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{гр} - \gamma_B) d_{ср} + 1,25K_0 C_\lambda^Y]} \cdot \lambda$$

Откуда
$$a_2 \approx 0,08 \cdot \lambda \cdot Arsh \frac{1,47 \cdot 0,4 \cdot n_u h^2}{\lambda [1,0 \cdot (2,6 - 1,0) \cdot 0,000008 + 1,25 \cdot 0,4 \cdot 0,0001]} \quad (VI.3.9)$$

Тогда значение нижней границы размыва берега (a_2) водохранилища, сложенного крупными связными грунтами, будет:

$$a_2 = 0,08 \cdot \lambda \cdot Arsh 1152,90 \frac{h^2}{\lambda} \quad (VI.3.10)$$

К примеру, если $h = 1,4$ м, $\lambda = 6,0$ м, $d_{ср} = 0,008$ мм, то

$$a_2 = 0,08 \cdot 6 \cdot Arsh \frac{1152,9 \cdot 1,96}{6} = 0,48 \cdot Arsh 400,0 = 0,48 \cdot 2,1 = 1,01 \text{ м}, a_2 = 1,01 \text{ м},$$

где $Arsh 400 = 2,1$ — значение обратного гиперболоидного синуса $y = Arshx$ (рис. VI.3.3).

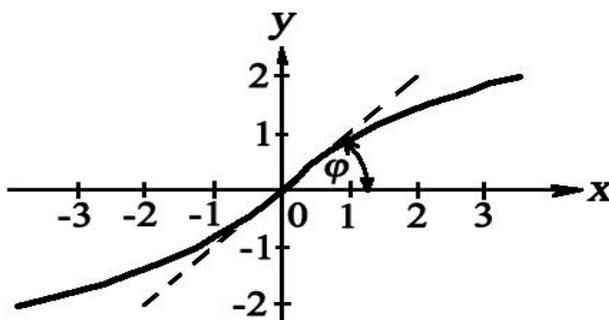


Рис. VI.3.3. Значение обратного гиперболоидного синуса

Для **связных мелкозернистых грунтов** ($d_{ср} \leq 0,001$ мм – 0,000001 м) формула (VI.3.8) примет вид:

$$a_2 = 0,08 \cdot \lambda \cdot Arsh \frac{0,58h^2}{\lambda(1,6 \cdot 0,000001 + 1,25 \cdot 0,4 \cdot 0,0001)} =$$

$$= 0,48 Arsh 8787,0 = 0,48 \cdot 2,3 = 1,1 \text{ м.}$$

Т.о., значение нижней границы размыва берега (a_2) водохранилища, сложенного **мелкими связными грунтами**, записывается следующим образом:

$$a_2 = 0,08 \cdot \lambda \cdot Arsh \frac{h^2}{\lambda \cdot 0,000076} = 0,08 \cdot \lambda \cdot Arsh 13157 \frac{h^2}{\lambda} \quad (\text{VI.3.11})$$

К примеру, если $h = 1,4$ м, $\lambda = 6,0$ м, тогда

$$a_2 = 0,08 \cdot 6 \cdot Arsh \frac{1,96}{6 \cdot 0,000076} = 1,02 \text{ м}$$

Т.к. формула (VI.3.8) является многофакторной, где необходимо учитывать девять факторов, поэтому возникла необходимость оптимизации данного метода.

Оптимизация расчета нижней границы размыва берега, сложенного из связных грунтов

Расчет нижней границы размыва (a_2) берега, сложенного **из связных грунтов**, можно упростить, используя рисунок VI.3.1.

Построение окончательного прогнозного профиля размыва берега, сложенного из однородных грунтов осуществляется в следующей последовательности (рис. VI.3.1):

- 1) Из точки a до точки b проводится линия, наклоненная к горизонту под углом α_2 . Точка b расположена на пересечении линий ab и bc , проведенной из точки c . Точка b делит линию на две равные части ($A/2$); значения угла α_2 приведены в таблице VI.3.4;
- 2) Из точки b проведена линия, наклоненная к горизонту под углом α_1 ;
- 3) Из точки c , проведена горизонтальная прямая;
- 4) Полученный отрезок (S) и есть расчетная ширина размыва берега.

Таблица VI.3.4

Угол наклона устойчивого берега (α_2)

Тип почвы		Условия	
		Выше уровня воды	Подводный
1	Гравий-галька	30° $m = \text{ctg} \alpha = 1,73$	25° $m = \text{ctg} \alpha = 2,1$
2	Крупнозернистый и мелкозернистый песок	26°÷28° $m = \text{ctg} \alpha = 2,1 \div 1,9$	15°÷20° $m = \text{ctg} \alpha = 3,7 \div 2,7$
3	Песок и глина	15°÷23° $m = \text{ctg} \alpha = 3,7 \div 2,4$	6°÷14° $m = \text{ctg} \alpha = 9,5 \div 1,1$
4	Глина	> 20°	5° - 10°

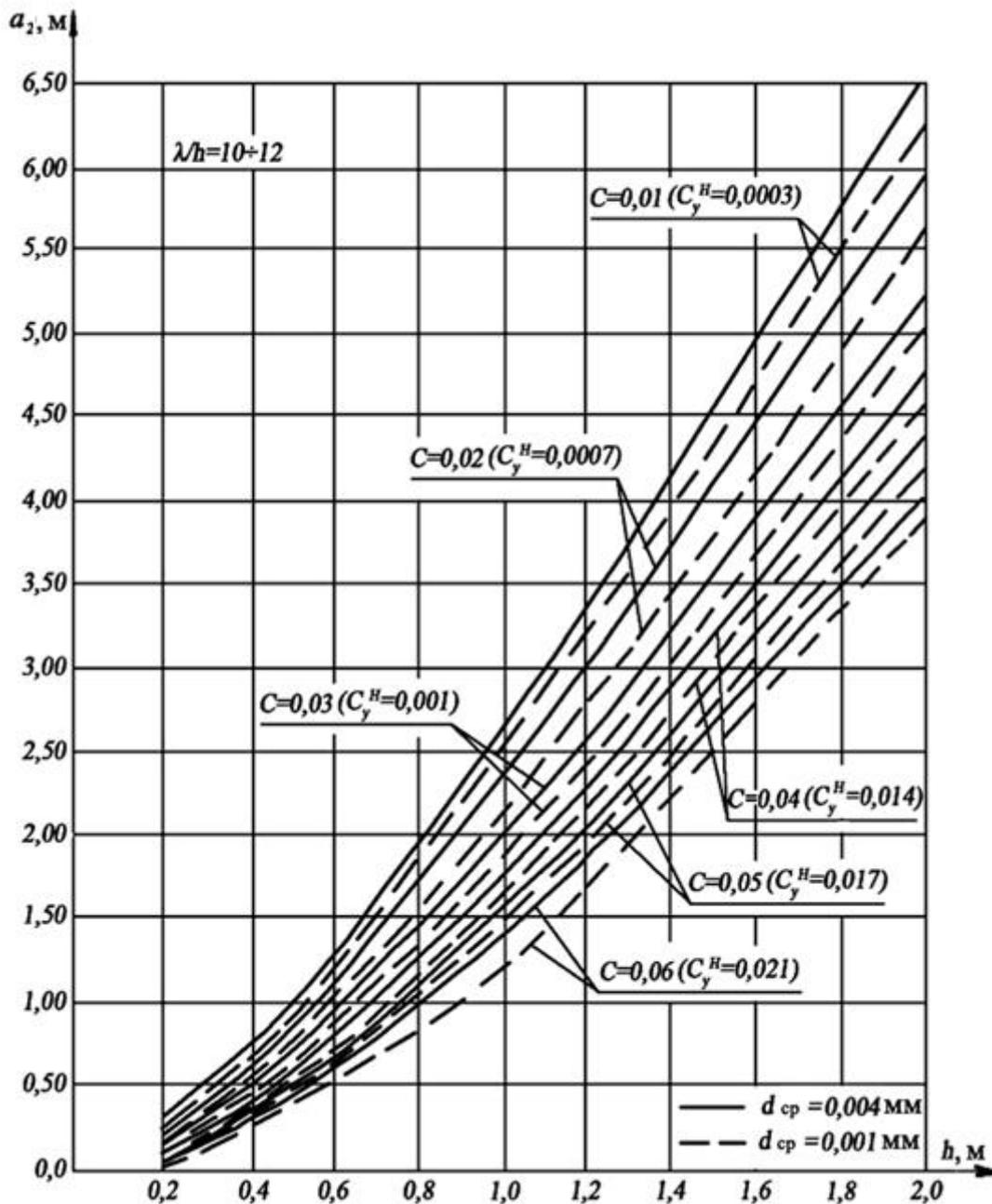


Рис. VI.3.4. Зависимость нижнего предела размыва берега (a_2), сложенного из связных грунтов, от высоты волны (h), сцепления грунтов склона (C) и среднего диаметра грунта (d_{cp}) (1 – $d_{cp} = 0,004$ мм; 2 – $d_{cp} = 0,001$ мм; $\lambda/h = 10 \div 12$)

Период ($T_{год}$), в течение которого берег водохранилища примет окончательный профиль, составит:

$$T_{год} = \frac{S}{V_{max}}, \text{ год}, \quad (VI.3.12)$$

где S расчетная ширина размыва берега, м; V_{max} – максимальная скорость размыва берега, м/год (рис. VI.3.5).

В практических расчетах допускается, что верхняя граница размыва берега, сложенного из глины, составляет $a_1 \approx h$, м; а нижний предел $a_2 = 1,3 h$ м, где h — высота волны (м).

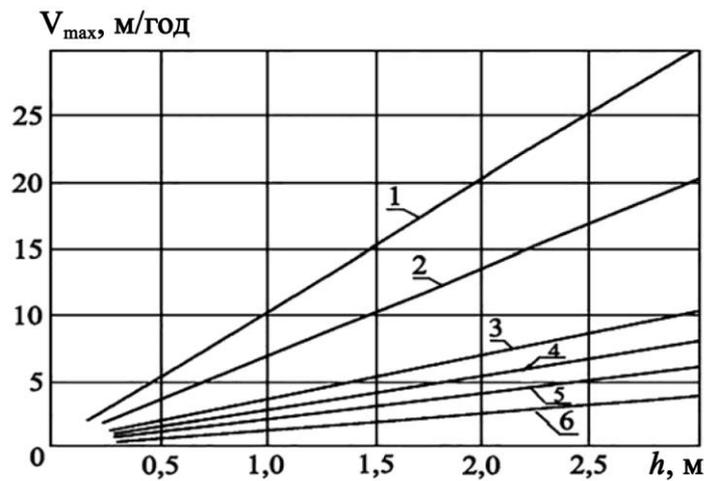


Рис. VI.3.5. График $V_{max} = f(h)$

1 – лес; 2 – песок мелкозернистый; 3 – песок среднезернистый;
4 – суглинок; 5 – глина; 6 – крупнозернистый песок

Пример построения абразионного прогностического берега Тбилисского водохранилища показан на рисунке VI.3.6 и в таблице VI.3.5.

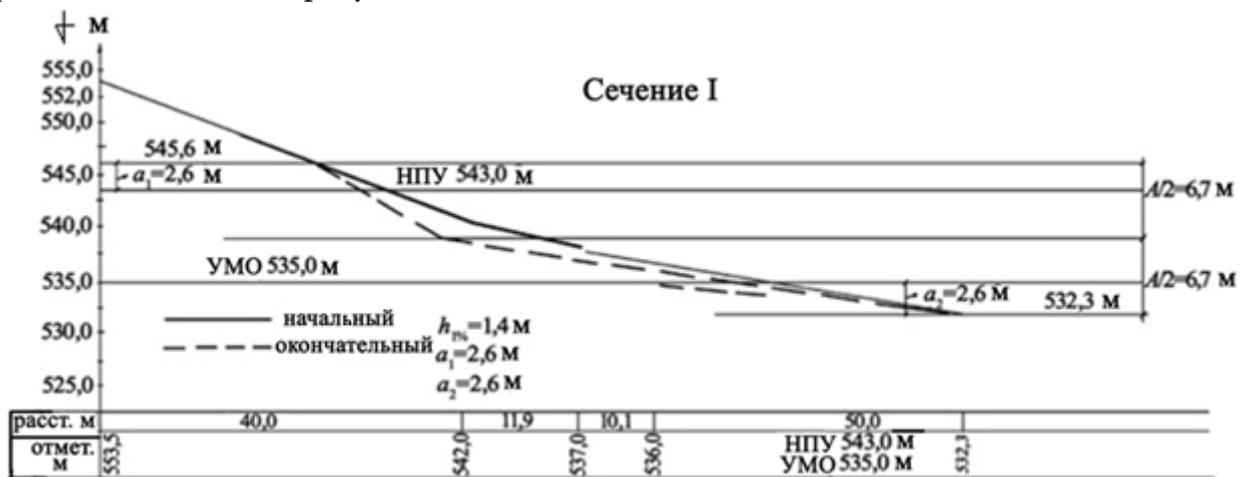


Рис. VI.3.6. Поперечный профиль абразионной отмели Тбилисского водохранилища

Таблица VI.3.5

Расчет верхней (a_1) и нижней (a_2) границ размыва берега Тбилисского водохранилища

(сечение I-I; $\lambda/h = 10$, $d_{cp} = 0,004$ мм; $C = 0,06$)

$A_b = f(a)$ (таблица VI.3.1)	Длина разгона волн по северному направлению ветра, км	Скорость V_C , м/см	h , м	$P\%$	$h\%$, м	$K_{пер}$ - табл. VI.3.3	$K_{гип}$ ($\alpha = 12^\circ$)	$h_{гип}$, м	$h_{волн.наг.}$, м	$h_{вет.наг.}$, м	a_1 - (формула VI.3.2)	a_2 (рис. VI.3.4)	Угол наклона естественного берега (выше уровня воды) $\alpha^{\circ 1}$	Угол наклона берега (подводный), $\alpha^{\circ 2}$
0,014	3,5	37,0	1,4	1,1	1,54	0,9	1,2	1,83	0,77	0,01	1,6	2,7	20,0	10,0
											1,3	1,5		

VII. ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ И ПРОЦЕССЫ САМООЧИЩЕНИЯ В ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ ГРУЗИИ

VII.1. ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Качество воды водохранилищ является одним из важнейших показателей, определяющих эффективное и рациональное использование водных ресурсов [Гигиенические требования, 2001 (на грузинском языке); Уйма А., Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Вартанов М.В., Канделаки Н.В., Иорданишвили К.Т, 2019].

Создание и эксплуатация водохранилищ связаны с интересами потенциальных пользователей, таких как обеспечение питьевой водой, сельскохозяйственных и городских территорий; развитие промышленного и рыбного хозяйства, использование прибрежной зоны в рекреационных целях и др.

Так как только допустимые показатели качества воды позволяют активно ими управлять, поэтому любого пользователя в первую очередь интересует качество воды водохранилища [Тевзадзе Т., Иорданишвили И., Поцхверия Д., 2012 (на грузинском языке)].

Качество воды в водохранилищах зависит от условий формирования естественного и хозяйственного стока вод. Например, для эпидемической безопасности, физические свойства (запах, вкус, кислотность и др.), химический состав являются нормативными показателями для питьевого и сельскохозяйственного потребления воды. Показателем воды, используемой в производственных целях, является степень минерализации, жесткость и наличие взвешенных наносов.

Качество воды в водохранилищах определяется гидрохимическими характеристиками речного стока. Химический состав воды водохранилища обусловлен геологическим строением его бассейна и окружающей территории. После затопления в геосреде водохранилища развивается ряд процессов: размыва берегов, активизация временных и постоянных водотоков, впадающих в водохранилище, засоление почв в прибрежной зоне и др. В условиях интенсивного водопотребления и высокой аэрации в вегетационный период в водохранилищах мелиоративного назначения наряду со снижением уровня воды происходит значительное увеличение минерализации.

Качество воды определяется пятью группами показателей [Р. Диаконидзе, Г. Чахая, Л. Цулукидзе, З. Варазашвили, Ш. Купрейшвили, Т. Супаташвили, Н. Мтиулишвили, 2013 (на грузинском языке)]:

1. Физические показатели воды и концентрация ряда веществ (мг/л); температура; значение *PH*; количество растворенного кислорода и растворенных веществ; жесткость, количество хлоридов, сульфатов, железа, марганца, аммония, нитратов и др.;
2. Концентрация органических веществ: перманганатное и бихроматное окисление (мг O_2 /л), биохимическое использование кислорода (мг O_2 /л), экстрагированные вещества, органический углерод и органический азот;
3. Концентрация неорганических веществ: ртуть, кадмий, свинец, мышьяк, хром,

никель, цианиды, сульфиды, фториды (мг/л);

4. Показатели концентрации промышленных органических загрязнителей: анион-активные моющие средства, летучие фенолы, нефтепродукты (мг/л);
5. Биологические показатели: сапробильность, количество микроорганизмов и специфические показатели: цвет; запах; наличие бария, бора, молибдена и др.

Классические гидробиологические показатели используются для определения чистоты воды водохранилищ, в частности, оценки их трофности. **Олиготрофность** водохранилища соответствует достаточно чистой воде, **мезотрофность** – чистой, **слабая эвтрофия** – незначительно слабозагрязненной, **сильная эвтрофия** – слабозагрязненной, **политрофия** – сильно загрязненной, **гипертрофия** – достаточно сильно загрязненной.

Допустимые нормативные показатели качества воды водохранилищ по видам использования приведены в таблице VII.1.1.

Таблица VII.1.1

**Желаемые и допустимые значения показателей качества воды,
используемой для разных целей**

Показатели качества воды	Величина	
	Желаемые	Допустимые
1	2	3
Для питьевого водоснабжения		
Группа А		
Температура °С	15,0	20,0
Величина рН	6,5-8,0	6,5-8,5
Общее количество растворенных веществ, мг/л	400,0	800,0
Общая жесткость (Н°)	15,0	20,0
Хлориды, мг/л	100,0	300,0
Сульфаты, мг/л	100,0	400,0
Железо (общее), мг/л	0,3	0,5
Марганец (общий), мг/л	0,05	0,1
Аммоний, мг/л	0,05	1,0
Нитриты, мг/л	0,0	0,002
Нитраты, мг/л	5,0	10,0
Группа Б		
Перманганатная окисляемость (мг/л)	5,0	10,0
Бихроматная окисляемость (мг/л)	15,0	25,0
Биохимическое потребление кислорода (мг/л)	3,0-4,0	5,0
Экстрагированные вещества (мг/л)	0,2	0,5
Группа Г		
Ртуть, мг/л	–	1,0
Кадмий, мг/л	–	10,0
Свинец, мг/л	–	50,0
Мышьяк, мг/л	–	50,0
Медь, мг/л	–	1100,0
Хром (общий), мг/л	–	–

1	2	3
Никель, мг/л	–	100,0
Цинк, мг/л	–	5,0
Легко выделяющиеся цианиды, мг/л	–	0,05
Общее количество цианидов, мг/л	–	–
Фториды, мг/л	1,0	1,5
Группа Д*		
Анионактивные моющие средства, мг/л	–	–
Летучие фенолы, мг/л	–	–
Нефтепродукты, мг/л	–	–
Специфические показатели**		
Цветность, мг Pt/л	10	20-30
Запах	–	–
Барий, мг/л	0,1	1-4
Бор, мг/л	0,5	1,0
Селен, мг/л	–	10,0
Серебро, мг/л	–	50,0
Ванадий, мг/л	–	–
Вода, используемая для орошения в сельском хозяйстве		
Группа А		
Величина рН	6,0-8,5***	5,9-9,0
Общее количество растворенных веществ, мг/л	500,0	1200,0
Хлориды, мг/л	300,0	400,0
Железо (общее), мг/л	1,5	10,0
Марганец (общий), мг/л	0,2	0,8
Группа Б		Не регламентируется
Группа Г		
Ртуть, мг/л	5,0	5,0
Кадмий, мг/л	–	30,0
Свинец, мг/л	–	200,0
Мышьяк, мг/л	–	200,0
Медь, мг/л	–	500,0
Хром (общий), мг/л	–	500,0
Кобальт	–	500,0
Никель, мг/л	–	500,0
Цинк, мг/л	–	10,0
Фториды, мг/л	1,5	3,0
Специфические показатели		
Процентный эквивалент натрия	35,0	35,0
Алюминий, мг/л	–	20,0
Бериллий, мг/л	–	200,0

1	2	3
Бор, мг/л	0,5	1,0
Литий, мг/л	0,0	2,0
Молибден, мг/л	–	50,0
Селен, мг/л	–	20,0
Ванадий, мг/л	–	1000,0
Показатели качества воды, которые обеспечивают ихтиофауну проточных вод		
Группа А		
Максимальная летняя температура, необходимая для воспроизводства лососевых рыб, °С	–	20,0
Величина рН	6,5-8,0	6,5-8,5
Количество растворенного кислорода, мг/л	>6,0	4,0
Общее количество растворенных веществ, мг/л	400,0	800,0
Общее количество взвешенных веществ*, мг/л	–	–
Железо (общее), мг/л	–	–
Аммоний, мг/л	0,1	0,5
Фосфаты, мг/л	0,05	0,2
Общий фосфор (PO ³⁻⁴ , мг/л)	0,1	0,5
Группа Б		
Бихроматная окисляемость (мг/л)	<15,0	25,0
Биохимическое потребление кислорода (мг/л)	<2,0	3,0
Органический углерод, мг/л	<2,0	6,0
Органический азот, мг/л	–	2,0
Группа Г		
Ртуть, мг/л	–	0,2-1,0
Кадмий, мг/л	–	5,0
Свинец, мг/л	–	100,0
Мышьяк, мг/л	–	50,0
Хром (общий), мг/л	–	–
Никель*, мг/л	–	–
Цинк, мг/л	–	–
Легко освобождающиеся цианиды, мг/л	–	0,002
Общее количество цианидов, мг/л	–	0,02-0,05
Группа Д		
Анионоактивные моющие детергенты, мг/л	–	0,1-0,5
Летучие фенолы, мг/л	–	0,01
Нефтепродукты, мг/л	–	0,05

* – Определяется в соответствии с «Национальными стандартами».

** – Другие специфические вещества, включая пестициды, не указанные в таблице, определяются в соответствии с «Национальными стандартами».

*** – Для щелочных почв можно использовать воду с рН <6,0.

Согласно рекомендациям Совета экономической взаимопомощи (СЭВ) европейских стран («Общие критерии качества воды») показатели экологических нормативов качества воды (классы) приведены в таблице VII.1.2.

Таблица VII.1.2

**Нормативы качества поверхностных вод
по экологическим позициям**

Показатели	Класс качества воды*)					
	I	II	III	IV	V	VI
1	2	3	4	5	6	7
А – Показатели неорганических веществ						
Температура, °С	<20	25	25	30	>30	>30
Величина рН	6,5-8,0	6,5-8,5	6,5-8,5	6,0-8,5	6,0-9,0	6,0-9,0
Растворенный кислород, О ₂ мг/л	>8	6,0	5,0	3,0	2,0	<2,0
Насыщенный О ₂ (% насыщения)	>90,0	75,0	60,0	40,0	20,0	<20,0
Общее количество растворенных веществ, мг/л	<300,0	500,0	800,0	1000,0	1200,0	>1200,0
Общее количество взвешенных веществ, мг/л	<20,0	30,0	50,0	100,0	200,0	>200,0
Общая жесткость (Н°)	<15,0	20,0	30,0	40,0	50,0	>50,0
Хлориды, мг/л	<50,0	150,0	200,0	300,0	500,0	>500,0
Сульфаты, мг/л	<50,0	150,0	200,0	300,0	400,0	>400,0
Железо, общее, мг/л	<0,5	1,0	1,0	5,0	10,0	>10,0
Марганец (общий), мг/л	<0,05	0,1	0,3	0,8	1,5	>1,5
Аммоний, мг/л	<0,1	0,2	0,5	2,0	5,0	>5,0
Нитриты, мг/л	<0,002	0,0035	0,02	0,05	0,1	>0,1
Нитраты, мг/л	<2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	>20,0
Фосфаты, мг/л	<0,025	0,2	0,5	1,0	2,0	>2,0
Общий фосфор, мг/л	<0,05	0,4	1,0	2,0	3,0	>3,0
Б – Суммарные показатели органических веществ						
Химическая потребность кислорода (ПО – О ₂ , мг/л)	<5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	>40,0
Биохимическая потребность кислорода (БО – О ₂ , мг/л)	<15,0	25,0	50,0	70,0	100,0	>100,0
Биохимическая потребность кислороде (БПК ₅ – О ₂ , мг/л)	<2,0	4,0	8,0	15,0	25,0	>25,0
Органический углерод, мг/л	<3,0	5,0	8,0	12,0	20,0	>20,0
Экстрагируемые вещества, мг/л	<0,2	0,5	1,0	3,0	5,0	>5,0,0
Органический азот, мг/л	<0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	>10,0
В – Показатели неорганического промышленного загрязнения						
Ртуть, мг/л	<0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	>5,0
Кадмий, мг/л	<3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	>30,0
Свинец, мг/л	<10,0	20,0	50,0	100,0	200,0	>200,0

1	2	3	4	5	6	7
Хром (общий), мг/л	<0,0	20,0	20,0	50,0	100,0	>100,0
Мышьяк, мг/л	<10,0	20,0	50,0	110,0	200,0	>200,0
Медь, мг/л	<20,0	50,0	100,0	200,0	500,0	>500,0
Кобальт, мг/л	<10,0	20,0	50,0	100,0	500,0	>500,0
Никель, мг/л	<20,0	50,0	100,0	200,0	500,0	>500,0
Цинк, мг/л	<0,2	1,0	2,0	5,0	10,0	>10,0
Общее количество цианидов						
Свободный хлор, мг/л	0,0	0,0	0,0	<0,005	0,1	>0,1
Сульфиды, мг/л	0,0	0,0	0,0	0,01	0,02	>0,02
Г – Показатели органических веществ промышленных загрязнителей						
Анионактивные моющие средства, мг/л	0,0	<0,5	1,0	2,0	3,0	>3,0
Летучие фенолы, мг/л	<0,002	0,01	0,05	0,1	1,0	>1,0
Нефтепродукты, мг/л	0,0	<0,05	0,1	0,3	1,0	>1,0
Д – Биологические показатели						
Сапробильность Пантл Бука индекс	<1,0	1,5	2,5	3,5	4,0	>4,0
Модификация Sladcheck	Ксенон сапробильность	Олиго-сапробильность	Бета-мезо-сапробильность	Альфа-мезо сапробильность	Поли сапробильность	Гипер сапробильность
Коли титр (фекальный тип)	1	0,1	0,01	0,001	<0,001	>0,001
Общее количество микроорганизмов	<5·10 ⁵	<10 ⁶	<3·10 ⁶	<5·10 ⁶	<10 ⁷	>10 ⁷
Снижение интенсивности биохимической трансформации	0,0	0,0	<10%	<30%	<70%	>70%
*) I класс воды – очень чистая; вода II класса – чистая; вода III класса – довольно слабозагрязненная; вода IV класса – слабозагрязненная; вода V класса – сильно загрязненная; вода VI класса – довольно сильно загрязнена.						

Оценка качества воды в водохранилищах основана по виду ее пригодности. Широко используется **сокращенный вариант** классификации природных вод, учитывающий три показателя ее качества: I класс – пригодная вода; II – вода, которая будет допущена к использованию после ее очистки; III – загрязненная вода.

Особое значение приобретают санитарно-биологические показатели качества воды, определяющие ее пригодность для питья.

Химические элементы аккумулируются в водохранилищах [Д. Кереселидзе, 1994 (на грузинском языке); Чантладзе З.И., 1972]. При этом, чем больше объем водохранилища и скорость водообмена, тем меньше их концентрация.

Сезон года оказывает существенное влияние на химический состав воды в водо-

хранилищах [Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Итриашвили Л.А., Иорданишвили К.Т., Натрошвили Г.Т., Хосрошвили Е.З., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б., 2019; Чантладзе З.И., 1972]:

- в период весенних и осенних паводков, когда происходит повышение уровня минерализация вод значительно снижается;
- летом – в период интенсивного водопотребления, когда происходит резкое понижение уровня воды, из-за повышения температуры воздуха увеличивается испарение с поверхности водохранилища, что приводит к увеличению минерализации воды.

На основании данных о минерализации воды ряда водохранилищ Грузии можно выделить водохранилища с высокой и низкой минерализацией. К высокоминерализованным водохранилищам можно отнести водохранилища, минерализация которых превышает 1%.

VII.2. ПРОЦЕССЫ САМООЧИЩЕНИЯ В ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Состав воды в водохранилище зависит от его самоочищающей способности, интенсивность которой определяется рядом факторов – жизнедеятельностью бактерий, грибов, водорослей, животных и микроорганизмов, солнечной радиацией, кислотностью воды, температуры и интенсивности водообмена.

Самоочищение горных водохранилищ происходит более интенсивно за счет многократного разбавления их пресной водой.

В средней части горных водохранилищ (на большой глубине) процессы самоочищения резко замедлены, эти процессы более интенсивны у берегов – в районе вската волн на берег. Динамика процессов самоочищения в водохранилищах зависит от перемешивания воды во время штормов, периодического опорожнения-наполнения водохранилищ и их промывки, паводков, химических и физико-химических процессов, осаждения наносов, обмена воды, сорбции загрязняющих веществ, биологических самоочищений, образования свободного кислорода и др.

Химический состав воды в водохранилище меняется в зависимости от сезона года: в сезон весеннего и осеннего половодья значительно снижается минерализация воды; а летом, в период интенсивного водопотребления, когда уровень воды резко падает, в связи с повышением температуры воздуха и ускорением процесса испарения с поверхности водохранилища, происходит увеличение минерализации вод.

В горных водохранилищах происходят два типа процессов водообмена – **внешний водообмен** и **внутренний водообмен**.

Значение коэффициента **внешнего водообмена полного объема** ($V_{\text{полн}}$) водохранилище определяется соотношением:

$$K_{\text{полн}}^{\text{внеш.}} = W_{\text{сток}} / V_{\text{полн}}, \quad (\text{VII.2.1})$$

где $W_{\text{сток}}$ – объем воды, поступающей в водохранилище.

Соответственно, значение **коэффициента** ($W_{\text{полн}}$) внешнего водообмена полезного объема водоема определяется зависимостью:

$$K_{\text{полн}}^{\text{внеш.}} = W_{\text{сток.}}/V_{\text{полн}} \quad (\text{VII.2.2})$$

Классификация «горности» (гипсометрическая зональность), регулирования объема, водообмена, водопользования и других показателей водохранилищ приведена в таблице VII.2.1.

Таблица VII.2.1

Основные показатели классификации водохранилищ

№	Показатели классификации	Группа	Различные показатели	Определяющий критерий	Нормативные критерии
1	2	3	4	5	6
I	Область использования водохранилища	1	Энергетический	Энергетика	–
		2	Ирригационный	Аккумуляция воды	–
		3	Комплекс	Комплексное	–
II	Генезис водохранилища	1	Русловой	В русле реки	–
		2	Озерное (наливное)	Дно озера	–
		3	Депрессионные	Депрессионная выемка	–
III	Гипсометрический показатель (∇) и индикатор горности (α)	1	Равнинные	Абсолютная отметка (∇), м	$\nabla < 400$ м
				Показатель рельефа, (α)	0,78
		2	Предгорные	Абсолютная отметка (∇), м	400-800 м
				Показатель рельефа, (α)	0,37
		3	Горные	Абсолютная отметка (∇), м	800-1200 м
				Показатель рельефа, (α)	0,27
		4	Высокогорные	Абсолютная отметка (∇), м	>1200 м
				Показатель рельефа, (α)	0,14
IV	Объем водохранилища, $V_{\text{полн}}$, млн м ³	1	Крупные	Полный объем, ($V_{\text{полн.}}$), млн м ³	$V_{\text{полн}} > 1$ млн м ³
		2	Средние		$V_{\text{полн}} > 100$ млн м ³
		3	Небольшие		100 млн м ³ >
		4	Малые		$V_{\text{полн}} > 10$ млн м ³
		5	Сравнительно малые		10,0 млн м ³ >
		6	Очень малые		$V_{\text{полн}} > 1$ млн м ³³
V	Глубина водохранилища, H_{max} , м	1	Очень глубокие	Максимальная глубина, (H_{max}), м	$H_{\text{max}} > 100$ м
		2	Глубокие		$40 < H_{\text{max}} < 100$ и

1	2	3	4	5	6
VI	Характер регулирования водохранилища	1	Интенсивного срабатывания	Амплитуда сработки уровня (A), м	$A > 100$ м $V_y > 1,0$ м/сутки
		2	Быстрого срабатывания	Скорость перемещения уровня, (V_y), м/сутки	$50 < A < 100$ м $0,5 < V_y < 1,0$ м/сутки
		3	Средней сработки		$20 < A < 49$ м $0,08 < V_y < 0,49$ м/сутки
		4	Нестабильные		$6,0 < A < 19$ м $0,03 < V_y < 0,79$ м/сутки
		5	Квазистабильные		$A < 6,0$ м $V_y < 0,03$ м/сутки
VII	Водообмен водохранилищ	1	Исключительно большой		Коэффициент использования среднегодовой сток реки, W_p , млн м ³ ; полный объем водохранилища, ($V_{полн}$), млн м ³ ; количество водообмена в год $п_{вод} = 1/K_{вод}$
		2	Очень большой	$0,24 > K_{вод} > 0,16$; $2,5 < п_{вод} < 10$ раз	
		3	Большой	$0,49 > K_{вод} > 0,25$; $2,5 < п_{вод} < 4,9$ раз	
		4	Средний	$0,99 > K_{вод} > 0,49$; $0,99 < п_{вод} < 2,5$ раз	
		5	Малый	$K_{вод} > 1$, $п_{вод} < 1$	
VIII	Использование стока в водохранилище	1	Эффективного использования	Коэффициент использования $K_{ис} = \frac{W_{полезн}}{W_{сток}}$; полезная водоотдача, ($W_{полезн}$), млн м ³ ; средний сток водой, ($W_{сток}$), млн м ³	$1,0 > K_{ис} > 0,9$
		2	Среднего использования		$0,89 > K_{ис} > 0,75$
		3	Равновесного использования		$0,74 > K_{ис} > 0,45$
		4	Низкого использования		$K_{ис} < 0,45$
IX	Использование водохранилища	1	Высокой емкости	Коэффициент емкости водохранилища $K_{ем} = \frac{V_{полезн}}{W_{потр.}}$; Использованное количество воды ($V_{исп.}$), млн м ³ ; полезный объем водохранилища ($V_{полезн.}$), млн м ³	$1,0 > K_{ем} > 0,5$
		2	Средней емкости		$0,49 > K_{ем} > 0,1$
		3	Равновесной емкости		$0,09 > K_{ем} > 0,001$
		4	Малой емкости		$K_{ем} < 0,001$

1	2	3	4	5	6
X	Срок службы водохранилища	1	Интенсивно заносимые водохранилища	Коэффициент условного заиления $K_{заил.} = \frac{W_{заил.}}{V_{полн.}}$; Объем твердого стока ($W_{тв.}$), млн м ³ ; Полный объем водохранилища – ($V_{полн.}$), млн м ³	$K_{заил} > 0,2$
		2	Среднезаиляемые водохранилища		$0,2 > K_{заил} > 0,04$
		3	Слабозаиляемые водохранилища		$0,04 > K_{заил} > 0,01$
		4	Практически не заиляемые водохранилища		$0,01 > K_{заил} > 0,002$
		5	Незаиляемые водохранилища		$K_{заил} < 0,002$

В зависимости от водообмена полного объема воды водохранилища можно разделить на **три типа**: водохранилища типа I – $п_{вод} > 3,0$; водохранилища типа II – $2,0 < п_{вод} < 3,0$; водохранилища типа III – $п_{вод} < 2,0$.

Высокими значениями коэффициента водообмена ($п_{вод}$) выделяются -Ладжанурское, Гуматское, ЗаГЭС и Варцихское водохранилища (табл. VII.2.2).

Внутренний водообмен обусловлен различными процессами – течениями, смешиванием, волнами, развивающимися в самих водохранилищах. При этом пульсации вызваны горизонтальными и вертикальными волновыми течениями. Согласно наблюдениям, горизонтальные водообмены более интенсивные, чем вертикальные. Вертикальный водообмен уменьшается с ростом глубины. В связи с этим вертикальный водообмен включает до 5-10% верхнего слоя воды.

В горных водохранилищах горизонтальный процесс водообмена более интенсивный, чем вертикальный.

Таблица VII.2.2

Основные показатели внешнего водообмена водохранилищ Грузии

№	Название водохранилища	Объем водохранилища		Отметка уровня водохранилища, м		Коэффициенты водообмена ^{*)}				Тип водохранилища по водообмену
		Полный, $V_{полн.}$, млн м ³	Полезный, $V_{полез.}$, млн м ³	НПУ, м	УМО, м	Полного объема		Полезного объема		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Водоохранилища Восточной Грузии										
1	Тбилисское (проект)	308,0	155,0	548,0	535,0	1,69	0,59	5,61	0,18	III
1 ¹	Тбилисское (факт)	215,0	65,0	538,0	535,0	1,18	0,85	2,35	0,43	III
2	Храмское	312,0	292,0	1512,0	1497,0	1,01	0,99	1,08	0,92	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	Сионское	325,0	300,0	1068,0	1014,0	0,95	1,10	1,00	1,00	III
4	Тавцкарройское	1,3	0,96	616,0	610,0	0,78	1,29	1,05	0,95	III
5	Марабдинское	1,2	1,2	555,0	547,0	0,75	1,33	0,75	1,33	III
6	Лапианское	3,5	3,5	429,0	417,0	0,74	1,35	0,74	1,35	III
7	Нареквавское	6,8	5,6	893,8	875,3	0,72	1,39	0,87	1,15	III
8	Джандарское	52,0	23,0	291,5	285,5	0,72	1,39	1,62	0,62	III
9	Мтисдзири	3,33	2,95	1650,0	1641,0	0,68	1,50	0,76	1,31	III
10	Кушисхеви	4,0	2,27	490,0	475,0	0,62	1,60	1,09	1,21	III
11	Кранчасхеви	1,26	0,92	480,0	477,0	0,51	2,00	0,72	1,39	II
12	Алгетское	65,0	60,0	792,5	745,0	0,50	2,00	0,54	1,85	II
13	Чальское	1,70	1,40	495,0	487,0	0,37	2,70	0,45	2,22	II
14	Жинвальское	520,0	370,0	810,0	770,0	0,37	2,70	0,52	1,92	II
15	Надарбазевское	8,2	7,2	862,0	855,4	0,32	2,72		2,78	II
16	ЗаГЭС	12,0	3,0	448,0	446,5	0,0159	466,7	62,92	94,3	I
17	Зресское	2,08	1,28	1721,82	1721,07	0,26	3,80	0,42	2,38	I
18	Зонкарское (Патара Лиахви)	40,0	39,0	1217,0	1167,0	0,13	7,70	0,13	7,70	I
Водохранилища Западной Грузии										
1	Шаорское	90,0	87,0	1132,0	1124,0	0,703	1,42	0,679	0,68	III
2	Кухское	1,9	1,85	170,0	158,0	0,657	1,52	0,64	1,56	III
3	Ткибульское	84,0	62,0	522,5	515,0	0,388	2,57	0,286	0,29	II
4	Гальское	145,0	26,0	100,55	97,0	0,029	3,34	0,056	0,05	I
5	Ингурское	1090,0	662,0	510,0	440,0	0,235	4,2	0,14	7,01	I
6	Ладжанурское	24,0	16,0	494,0	478,0	0,02	62,9	62,5	94,3	I
7	Гуматское	39,0	13,0	200,0	96,0	0,008	130,7	0,0025	0,003	I
9	Варцихское	14,6	2,4	87,0	86,5	0,002	589	0,0003	0,0003	I

$K_{\text{вод}}^{\text{полн.}} = V_{\text{полн.}}/W_{\text{сток}}$ – коэффициент водообмена полного объема; * $n_{\text{вод}}^{\text{полн.}} = W_{\text{сток}}/V_{\text{полн.}}$ – количество водообмена полного объема за один год ; * $K_{\text{вод}}^{\text{полезн.}} = V_{\text{полезн.}}/W_{\text{сток}}$ – коэффициент водообмена полезного объема водохранилища; * $n_{\text{вод}}^{\text{полезн.}} = W_{\text{сток}}/V_{\text{полезн.}}$ – количество водообменов полезного объема водохранилища

VII.3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ЖИНВАЛЬСКОГО И ТБИЛИССКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

Проблема водоснабжения г. Тбилиси была решена путем создания крупных водохранилищ. В 1952 г. было создано Тбилисское (Самгорское) водохранилище. Из-за быстрого роста г. Тбилиси проблема коммунального водоснабжения усугублялась, что обусловило создание новых водохранилищ. Для этой цели в 1963 г. было создано Сионское водохранилище. В последующие годы наблюдается серьезный дефицит мелиорационной воды. Созданием этих водохранилищ был почти полностью использован сток реки Иори ($Q = 13 \text{ м}^3/\text{сек}$). Для обеспечения питьевой и водой для орошения, необходимо было найти водные ресурсы в близлежащих реках. Эта проблема была решена в 1985 году строительством Жинвальского водохранилища, когда был создан каскад водохранилищ рек Иори-Арагви. В Тбилисское водохранилище поступает часть сезонного стока рек Арагви и Иори. С созданием Жинвальского водохранилища решена проблема обеспечения питьевой

водой и частично гидроэлектроэнергии. Вода от Жинвалского водохранилища (15 м³/с) через буферный бассейн подается в магистральный канал, а 5,2 м³/с – впадает в Тбилисское водохранилище, для снабжения питьевой водой г. Тбилиси и г. Рустави (рис. VII.3.1).

Для оценки качества воды в Жинвальском и Тбилисском водохранилищах были проведены полевые исследования в январе и июле 2022 и 2023 года. Пробы воды были взяты из двух предварительно запланированных участков Жинвальского водохранилища и одного участка Тбилисского водохранилища в районе отбора воды для питьевого снабжения г. Тбилиси и г. Рустави. Результаты химического анализа воды из водохранилищ приведены в таблице VII.3.1 [К. Иорданишвили, И. Иорданишвили, И. Иремашвили, М. Мгебришвили, И. Купарашвили, Н. Канделаки, Э. Хосрошвили, Л. Биланишвили, 2022 (на грузинском языке); K. Iordanishvili, I. Iordanishvili, K. Bziava, N. Kandelaki, T. Supatashvili, G. Omsarashvili, E. Khosroshvili, D. Potskhveria, L. Bilanishvili, 2023].

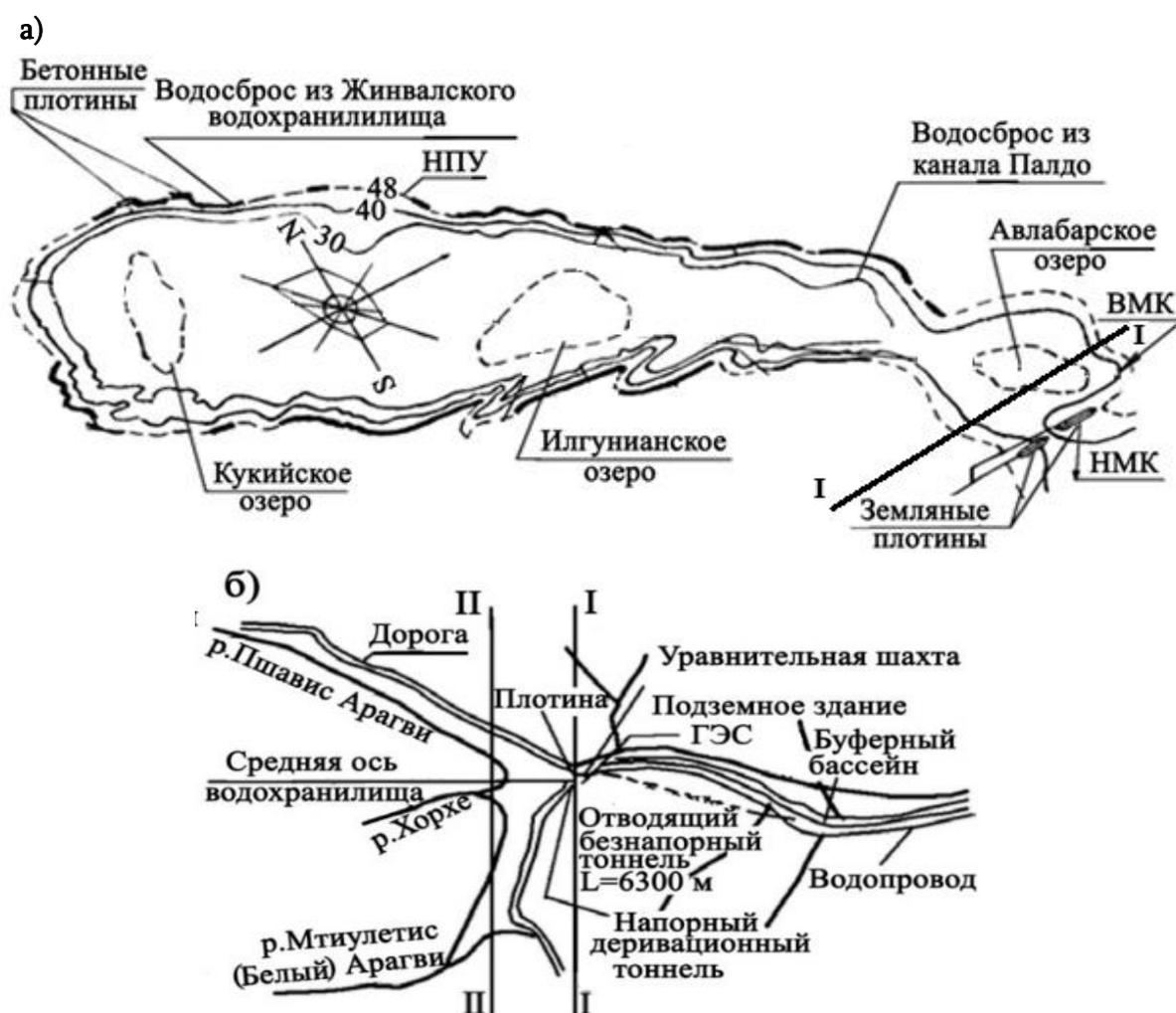


Рис. VII.3.1. Расположение мест отбора проб воды из а) Тбилисского и б) Жинвальского водохранилищ

- а) I-I - расположение мест взятия проб воды из Тбилисского водохранилища;
- б) I-I, II-II – расположение мест взятия проб воды из Жинвальского водохранилища

Таблица VII.3.1

Динамика химических показателей в водах Жинвальского и Тбилисского водохранилищ
(для Жинвальского водохранилища данные вдоль средней оси, 05. 01. 2022 - 05.07.2022 г.;
для Тбилисского водохранилища в створе I- I, 05. 01. 2023 - 05.07.2023 г.)

Дата взятия образцов воды: для Жинвальского водохранилища - 2022г. для Тбилисского водохранилища - №	Исследуемый показатель	Единица измерения	Не больше норматива	Данные Жинвальского водохранилища					Данные Тбилисского водхр-ща	Распределение химических элементов	Нормативный документ
				Результаты в сечении I-I (У плотины)			Результаты в сечении II-II		Результаты в сечении I-I на поверхности воды		
				У основания плотины, $\nabla=710,0\text{м}$	На поверхности воды, $\nabla, \text{м}$	На глубине 10,0 м от поверхности и воды $\nabla, \text{м}$	На поверхности воды, $\nabla, \text{м}$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Органолептические показатели											
05.01	1	Запах 20°C, 60°C	балл	1,0	0				0		1
05.07	1 ¹			1,0	0				0		1
05.01	2	Вкус 20°C	балл	1,0	0				0		1
05.07	2 ¹			1,0	0				0		1
05.01	3	Цвет 20 см	градус	15,0	<5,0				<5,0		2
05.07	3 ¹			15,0	<5,0				<5,0		2
05.01	4	Мутность	мг/л	не норматив	10,6				1,33		3
05.07	4 ¹				1,51				3,5		3
Общие показатели											
05.01	5	Показатель водорода	рН	6,5-8,5	7,99	7,95 ($\nabla=770,0\text{м}$)	7,90 ($\nabla=760,0\text{м}$)	7,80 ($\nabla=770,0\text{м}$)	8,11	В зависимости от глубины, длины и сезонности и – изменение незначительно	4
05.07	5 ¹			6,5-8,5	7,79	7,75 ($\nabla=800,0\text{м}$)	7,70 ($\nabla=790,0\text{м}$)	7,75 ($\nabla=800,0\text{м}$)	7,78		4
05.01	6	Перманентное окисление	мг О ₂ /л	3,0	0,64				0,67		5
05.07	6 ¹			3,0	0,61				0,64		5
05.01	7	Сухой остаток	мг/л	1000	145,4	140,0 ($\nabla=770,0\text{м}$)	141,0 ($\nabla=760,0\text{м}$)	135,0 ($\nabla=770,0\text{м}$)	146,8	Растет от поверхности к глубине и от истока к плотине; максимум - зимой	6
05.07	7 ¹			1000	117,3	110,0 ($\nabla=800,0\text{м}$)	115,0 ($\nabla=790,0\text{м}$)	105,0 ($\nabla=800,0\text{м}$)	217,2		6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Неорганические вещества											
05.01	8	Барий (Ba ²⁺)	мг/л	0,1	0,02				0,02		7
05.07	8 ¹			0,1	0,01				0,03		7
05.01	9	Бор (В, суммарный)	мг/л	0,5	0,27				0,21		7
05.07	9 ¹			0,5	0,1				0,17		7
05.01	10	Мышьяк, суммарный (As)	мг/л	0,05	0,002				0,002		7
05.07	10 ¹			0,05	<0,001				0,001		7
05.01	11	Ртуть (Hg)	мг/л	0,0005	0,0004				0,0002		8
05.07	11 ¹			0,0005	<0,0001				0,0002		8
05.01	12	Кадмий (Cd, суммарный)	мг/л	0,001	<0,001				<0,001		7
05.07	12 ¹			0,001	<0,001				0,0011		7
05.01	13	Марганец (Mn, суммарный)	мг/л	0,1	0,01				0,002		7
05.07	13 ¹			0,1	0,003				0,001		7
05.01	14	Молибден (Mo, суммарный)	мг/л	0,25	0,001				0,001		7
05.07	14 ¹			0,25	0,001				0,001		7
05.01	15	Никель (Ni, суммарный)	мг/л	0,1	0,001				0,001		7
05.07	15 ¹			0,1	<0,001				0,001		7
05.01	16	Аммиак	мг/л	0,39	<0,08				<0,08		9
05.07	16 ¹			0,39	<0,08				<0,08		9
05.01	17	Нитраты (NO ₃ , краткого воздействия)	мг/л	45,0	0,75				0,34		10
05.07	17 ¹			45,0	0,91				0,36		10
05.01	18	Нитриты (NO ₂ , длительного воздействия)	мг/л	3,3	<0,075				<0,0075		10
05.07	18 ¹			3,3	<0,075				<0,0075		10
5.01	19	Селен (Se, суммарный)	мг/л	0,001	<0,001	<0,001 (∇ =770,0 м)	<0,001 (∇ =770,0 м)	<0,001 (∇ =770,0 м)	<0,0001	В пределах нормы не меняется в зависимос- ти от глубины, длины и сезонности	10
05.07	19 ¹			0,001	<0,001				<0,0001		10
05.01	20	Медь (Cu, суммарный)	мг/л	1,0	0,001				0,001		7
05.07	20 ¹			1,0	0,002				0,002		7
05.01	21	Свинец (Pb, суммарный)	мг/л	0,03	<0,001				0,001		7
05.07	21 ¹			0,03	0,002				0,004		7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
05.01	22	Фториды (F)	мг/л	0,05	0,09	0,08 (∇ =770,0м)		0,075 (∇ =770,0 м)	0,09	Норма растёт от устья к плотине, уменьшается с глубиной и к устью	10
05.07	22 ¹			0,05	0,07	0,07 (∇ =800,0м)		0,070 (∇ =800,0 м)	0,09		10
05.01	23	Хром (Cr ^{**})	мг/л	0,1	0,001				<0,001		7
05.07	23 ¹				0,1	<0,001				<0,002	
05.01	24	Стибий (Sb)	мг/л	0,05	<0,001				0,002		7
05.07	24 ¹				0,05	<0,001				0,001	
05.01	25	Цианиды (CN)	мг/л	0,1	<0,005				<0,005		11
05.07	25 ¹				0,1	<0,005				<0,005	
05.01	26	Сульфаты (SO ₄ ²⁻)	мг/л	500	23,25				65,37		10
05.07	26 ¹				500	18,77				58,75	
05.01	27	Хлориды (Cl)	мг/л	350,0	5,15				4,74		10
05.07	27 ¹				350,0	2,06				5,05	
05.01	28	Общая жесткость	мг-экв./л	7,0	2,71				2,41		12
05.07	28 ¹				7,0	2,25				3,95	
05.01	29	Щелочность	мг-экв./л	Не нормировано	2,44				1,31		13
05.07	29 ¹					2,04				3,05	
05.01	30	Кальций (Ca)	мг/л	Не нормировано	43,89				37,39		7
05.07	30 ¹					36				65,5	
05.01	31	Магний (Mg)	мг/л	Не нормировано	6,29				6,6		7
05.07	31 ¹					5,49				8,28	
05.01	32	Натрий (Na)	мг/л	Не нормировано	8,43				9,1		7
05.07	32 ¹					5,64				10,73	
05.01	33	Цинк (Zn ²⁺)	мг/л	1,0	0,001				<0,001		7
05.07	33 ¹				1,0	<0,001				<0,003	
05.01	48	Мезофильные аэробы и факультативные анаэробы	1 мл, 22°C	Не нормировано	72				290		23
05.07	48 ¹					291					125
05.01	49	Фекальные стрептококки	MPN 100 мл	Не нормировано	5.3				0		24
05.07	49 ¹					2.0					4,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
05.01	50	Сальмонелла	MPN 1 л	Не должен быть	Не обнару- жено				Не обнару- жено		25
05.07	50 ¹			Не обнару- жено				25			
05.01	51	Колифаги	1 л	100	Не обнару- жено				Не обнару- жено		26
05.07	51 ¹			100		Не обнару- жено			26		
Паразитологические показатели											
05.01	52	Цисты лямблий	Количество цист в 25 л	Не должно быть	Не обнару- жено				Не обнару- жено		26
05.07	52 ¹			Не должно быть		Не обнару- жено			26		
05.01	53	Цисты дизентерий- ных амieb	Количество цист в 25 л	Не должно быть	Не обнару- жено				Не обнару- жено		26
05.07	53 ¹			Не должно быть		Не обнару- жено			26		
Обозначения: используемые нормативные документы: 1 – GST 3351-74; 2 – GST ISO 7887:2011, 3 – GST ISO 7027-1:2016; 4 – GST ISO 10523:2008; 5 – GST ISO 8467:1993; 6 – GST 18164-72; 7 – GST ISO 11885:2007; 8 – AGILENT метод; 9 – GST ISO 7150-1:1984; 10 – GST ISO 10304 1:2007; 11 – HACH метод 8027; 12 – GST ISO 6059:1984; 13 – GST ISO 9963-1:1944; 14 – ISO 11923:1997; 15 – HACH метод 81166 (ISO 5814); 16 – HACH LCK 500 метод; 17 – ISO 5815-1 метод; 18 – ISO 7888; 19 – GST ISO 6468:1996; 20 – GST ISO 9377-2:2000; 21 – GST ISO 7875-1:1996; 22 – GST ISO 9308-2:2012; 23 – GST ISO 6222:1996; 24 – GST ISO 7899 1:1998 ENTEROLERTE; 25 – GST ISO 19250:2010; 26 – М.М. 4.2. 1884-04											

Т.о., **по катионам** воды Жинвальского и Тбилисского водохранилищ относятся к кальциево-натриево-магниевому типу, а **по анионам** – сульфатная и менее хлоридная. Оба водохранилища не являются причиной ухудшения качества воды, но являются жертвой загрязнения, стекающего с окрестностей и рек.

Газовый режим Жинвальского и Тбилисского водохранилищ, в основном, определяются кислородным режимом, который зависит от высокого количества растворенного кислорода (> 8,3 мг/л в Жинвальском и > 9,0 мг/л в Тбилисском водохранилище), что связано с высокой величиной водообмена водохранилища (2,7 раза в год Жинвальское и почти полностью – 0,85 раз в Тбилисском водохранилище). Высокое содержание кислорода способствует разложению анаэробных продуктов (аммиак, сероводород), перераспределению и накоплению химических элементов (железа, фосфора, цинка, марганца и др.) на дне водохранилища.

Минеральные и органические вещества поступают в Жинвальское и Тбилисское водохранилища, в основном, с речным и поверхностным стоком – с сельскохозяйственных полей и промышленных территорий. Их водосборные площади не сильно загружены

загрязняющими веществами от промышленных и сельскохозяйственных угодий. **Химические** показатели всех элементов воды Жинвальского и Тбилисского водохранилищ не превышают нормы, кроме показателя фторида (F), количество которого составляет 0,09 мг/л – зимой, 0,07 мг/л – летом (норма – < 0,05 мг/л для Жинвальского; для Тбилисского водохранилища – 0,09 мг/л).

Количество ряда элементов увеличивается летом, но находятся в пределах нормы. Что касается микробиологических и паразитологических элементов – в воде Жинвальского и Тбилисского водохранилища они не обнаружены.

В целях охраны санитарно-технического состояния Жинвальского и Тбилисского водохранилищ необходимо назначить границы санитарной зоны (С. Зон.) и водоохранной зоны (В. Зон.).

Осредненные данные химического качества воды ряда водохранилищ Грузии представлены в таблице VII.3.2.

Таблица VII.3.2

Осредненные показатели качества воды ряда водохранилищ Грузии (2010-2023 г.г.)

№	Группы показателей качества воды	Показатели качества воды	Время года	Водохранилище				Распределение по глубине, длине и сезону года	Допустимые нормативные показатели		
				Сионское	Тбилисское	Храмское (Шалкское)	Жинвальское		Для питьевой воды	Для орошения	Для рыб-водства
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	А	Водородный показатель, pH	Лето	6,75	7,87	7,51	7,79	Изменения незначительны в зависимости от глубины, длины и сезона. Макс. – зимой, мин. – летом и осенью	6,5÷8,5	5,9÷9,0	6,5÷8,5
			Зима	8,38	9,38	8,95	7,99				
2	А	Общее количество растворенных веществ, мг/л;	Лето Зима	500,0	500,0	–	117,3	Растет от поверхности воды ко дну и от устья к плотине. Макс. – зимой, мин. – летом	800,0	1200,0	800,0
3	Физические общие показатели	Растворенный кислород, O ₂ , мг/л	Лето	8,42	9,31	8,50	0,61	Уменьшается от поверхности воды ко дну и от устья к плотине. Макс. – зимой, мин. – летом и осенью			4,0
			Зима	13,50	11,95	11,90	0,64				

4		Хлориды, мг/л	Лето	8,20	21,30	12,10	2,06	Уменьшается от поверхности воды ко дну и от устья к плотине. Макс. – зимой, мин. – летом и осенью	300,0	400,0	
			Зима	31,30	53,10	18,30					
5		Сульфаты, мг/л	Лето	26,10	166,10	17,20	18,77	Изменения по глубине и протяженности водохранилища незначительны. Макс. – зимой, мин. – весной	400,0		
			Зима	64,25	352,0	60,86	23,25 VI				
6		Железо, мг/л	Лето	0,04	0,03	0,01	0,06	Изменения в глубине и протяженности водоема незначительны. Макс. - весной (кроме Жинвальского водохранилища)	0,5	10,0	–
			Зима	0,15	0,12	0,15	0,14				
7		Минеральный фосфор, мг/л	Лето	0,013	0,008	0,025	0,02	Увеличивается с глубиной. Макс. – летом, мин. – зимой		0,2	
			Зима	0,046	0,038	0,060	0,02				
8		Нитраты, мг/л	Лето	1,78	2,18	2,32	0,91	Увеличивается с глубиной, незначительно с длиной водохранилища, макс. – весной, мин. – летом (кроме Жинвальского водохранилища)	10,0	–	–
			Зима	9,98	6,12	4,21	0,75				
9	В	Перманганатная окисляемость, O ₂ , мг/л	Лето	1,86	1,72		0,61	Растет от устья к плотине и от поверхности ко дну. Макс. – летом, мин – осенью (кроме Жинвальского водохранилища)	10,0		
Зима			3,48	7,21		0,64					
10		Биохроматная окисляемость, O ₂ , г/л	Сред.	11,32	11,60	8,20			25,0		
			Макс.	25,60	37,86	15,86					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11	Газовый режим С	Содержание СО ₂ , мг/л	Лето	2,41	3,42	3,11		Увеличивается ко дну и от устья к плотине, макс. – зимой, увеличивается ко дну, мин. - летом и осенью			
			Зима	11,20	12,61	6,80					
12	Газовый режим С	Содержание гидрокарбо- натов НСО ₃ , мг/экв.л	Лето	2,48	2,68	1,62		Увеличивается ко дну и от устья к плотине, макс. – летом, мин. – весной			
			Зима	3,57	3,12	2,15					

VII.4. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

Развитие науки экологии началось с конца XIX века [Haeckel, 1866; Clements, 1905; Volterra, 1926]. Обобщение экологических вопросов было впервые предложено русским ученым В.И. Вернадским (1978). С 50-х годов XIX века наука экология развивалась с использованием математических методов, предельно допустимых нагрузок, многомерного статистического анализа катастроф, алгоритмов моделирования ландшафта и других теорий [Большаков В.Н., 1993; Израэль Ю.А., 1984; Кондратьев К.Я., 1995].

В последнее время широко применяется метод допустимого нормирования загрязняющих нагрузок на водные объекты [Израэль Ю.А., 1984; Henriksen A., 1992; Critical loads... 1994; Кондратьев К.Я., 1995; Глазовская М.А., 1988; Евсеев А.Е., 1996; Никаноров А.М., 1990; Безель В.С., 1993 и др.].

Оценку опасного состояния водохранилищ впервые провел грузинский ученый, академик Ц. Е. Мирцхулава [Мирцхулава Ц.Е., 2000].

Для выделенной зоны водохранилища рассчитан суммарный показатель трех типов загрязнения [Моисеенко Т.И., 1990].

Для определения индекса **первого типа** загрязнения рассчитывают степень загрязнения веществ ($X_{\text{токс.}}$):

$$X_{\text{токс.}} = \sum(C_i/C_{\text{п.д.к.}}), \quad (\text{VII.4.1})$$

где C_i – концентрация токсичного элемента; $C_{\text{п.д.к.}}$ – предельно допустимая концентрация.

Для определения индекса **второго типа** загрязнения рассчитывают состояние **мезотрофии**, образующейся за счет хлорофилла и фосфора в воде, которая оценивается по экологическому риску ($X_{\text{эвтр}}$):

$$X_{\text{эвтр}} = (C_{\text{фос.}}/C_{\text{фос. (допуст.)}} - 1) \cdot 2 \quad (\text{VII.4.2})$$

Если состояние водной эвтрофикации формируется за счет фосфора и хлорофилла, то экологический риск эвтрофикации равен:

$$X_{\text{эвтр}} = (C_{\text{фос.}}/C_{\text{фос. (допуст.)}} - 1) \cdot 3, \quad (\text{VII.4.3})$$

где $C_{\text{фос.}}$ – концентрация фактического количества фосфора; $C_{\text{фос.}}/C_{\text{фос. (допуст.)}}$ – концентрация

допустимого количества фосфора.

Индекс **третьего типа** загрязнения рассчитывается по общей минерализации воды и состоянию, образованному **сульфатами**, которое оценивается по физико-химическому критерию воды ($X_{ф.х.}$):

$$X_{ф.х.} = \sum(C_i/C_{доп.} - 1) \quad (VII.4.4)$$

Тогда **общий индекс** загрязнения ($X_{общ.}$) составит:

$$X_{общ.} = X_{токс.} + X_{эвтр} + X_{ф.х.} \quad (VII.4.5)$$

Значение общего показателя качества **абсолютно чистой воды** составляет $X_{общ.} = 0$, а при антропогенной нагрузке – $X_{общ.} > 0$.

Расчет общего показателя загрязнения воды Жинвальского водохранилища (для питьевой воды летом)

1. Расчет качества воды загрязненной металлами:

$$X_{токс.} = \sum(C_i/C_{п.д.к.}),$$

где (C_i) – количество сухого остатка у плотины ($\nabla=7100$ м) (см. формулу VII.4.1), $C_i = 117,3$ мг/л (см. табл. VII.3.1); $C_{п.д.к.} = 800$ мг/л – предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в питьевой воде (табл. VII.3.2). Тогда степень загрязнения допустимой минерализации питьевой воды равна:

$$X_{токс.} = 117,3/800 \approx 0,15$$

2. Расчет индикатора экологических рисков (летом)

$$X_{эвтр} = (C_i/C_{i\ доп.} - 1) \cdot 2 \text{ (см. формулу VII.4.2),}$$

где $C_i = 117,3$ мг/л, $C_{i\ доп.} = 1000$ мг/л (см. табл. VII.3.1), тогда

$$X_{эвтр.} = (117,3/1000 - 1) = -1,9 < 0 \quad \text{(см. формулу VII.4.4).}$$

3. Расчет физико-химического критерия загрязнения воды:

$$X_{ф.х.} = \sum(C_i/C_{доп.} - 1) \text{ (см. формулу VII.4.4),}$$

$$X_{ф.х.} = 117,3/1000 - 1 = 0,12 - 1 = -0,88 < 0.$$

4. Расчет общего индекса загрязнения:

$$X_{общ.} = X_{токс.} + X_{эвтр} + X_{ф.х.} \text{ (см. формулу VII.4.5),}$$

$$X_{общ.} = 0,15 + (-1,9) + (-0,88) = -2,63 < 0,1.$$

Т.о., вода Жинвальского водохранилища абсолютно чистая (даже летом, когда количество загрязняющих веществ увеличивается). Такой расчет важен, потому что вода Жинвальского водохранилища используется для питьевого назначения в г. Тбилиси и Рустави.

VIII. МЕТОДЫ СОХРАНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

VIII.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОПОРОЖНЕНИЯ И НАПОЛНЕНИЯ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Для проведения различных работ на водохранилище (очистка дна от наносов, ремонтные работы галерей и водоотводных сооружений и др.) необходимо полностью или частично опорожнить его объем. Для этого необходимо заранее определить время опорожнения (наполнения) водохранилища.

В последнее время актуальна проблема опорожнения горных водохранилищ, поскольку значительно активизировались седиментационные и абразионные процессы. Расчет времени (T) опорожнения (наполнения) водохранилища проводился приближенным методом [Павловский Н.Н., 1937; Киселев П.Г., 1972].

При расчете времени опорожнения (наполнения) горного водохранилища воспользуемся гидравлической задачей истечения (наполнения) воды из водохранилища при переменном напоре. При рассмотрении гидравлической задачи – задачи об истечении (наполнении) при изменении напора в водохранилище примем следующие обозначения (рис. VIII.1.1; рис. VIII.1.2).

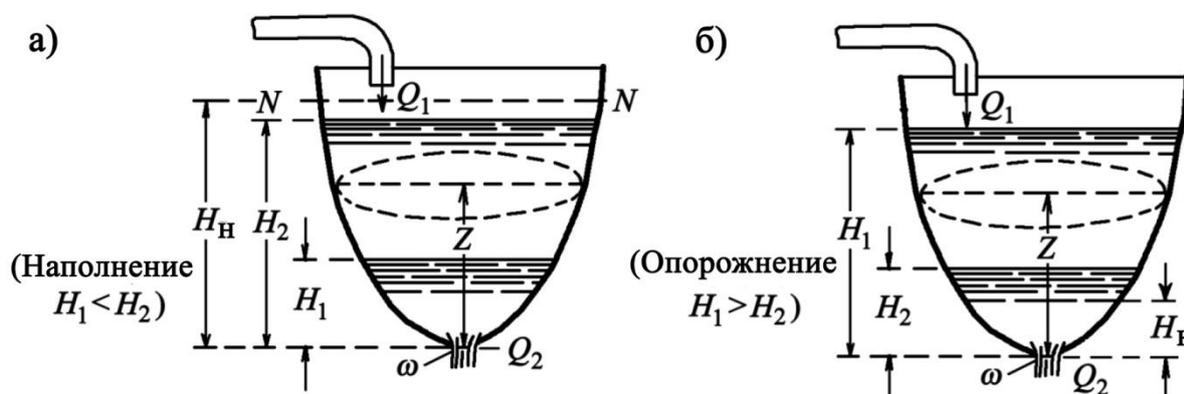


Рис. VIII.1.1 Гидравлические схемы наполнения (а) и опорожнения (б) водохранилища, Z – переменный напор на выходе (отверстие), м; F – площадь зеркала водной поверхности водохранилища при соответствующем напоре, м²; Q_1 – скорость притока воды в водохранилище, м³/с; Q_2 – скорость оттока воды из водохранилища, м³/с; H_1 – начальный напор на водовыпуск (отверстие), м; H_2 – конечный напор на водовыпуск (отверстие), м; H_n – т.н. "нормальный" напор, м; t_1, t_2 – значения моментов времени при соответствующих (H_1) и (H_2) напорах, $(t_2 - t_1) = T$ – время опорожнения (наполнения) водохранилища, сек.; ω – площадь отверстия, м²; μ – 0,60-0,62 – коэффициент скорости отверстия.

При оценке баланса выпуска воды из водохранилища используется гидравлическая задача выпуска воды из отверстия при переменном напоре (dz) [Большаков В. А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Нетюхайло А.П., Шеренков И.А., Даденко В.Ю., Клещевникова Т.П., Железняк И.А., 1984]:

$$F dz = Q_1 dt - Q_2 dt, \quad (\text{VIII. 1.1})$$

где Q_1 – скорость воды, поступающей в водохранилище, Q_2 – скорость воды, вытекающей из водохранилища, dz – изменение уровня водной поверхности во времени (dt).

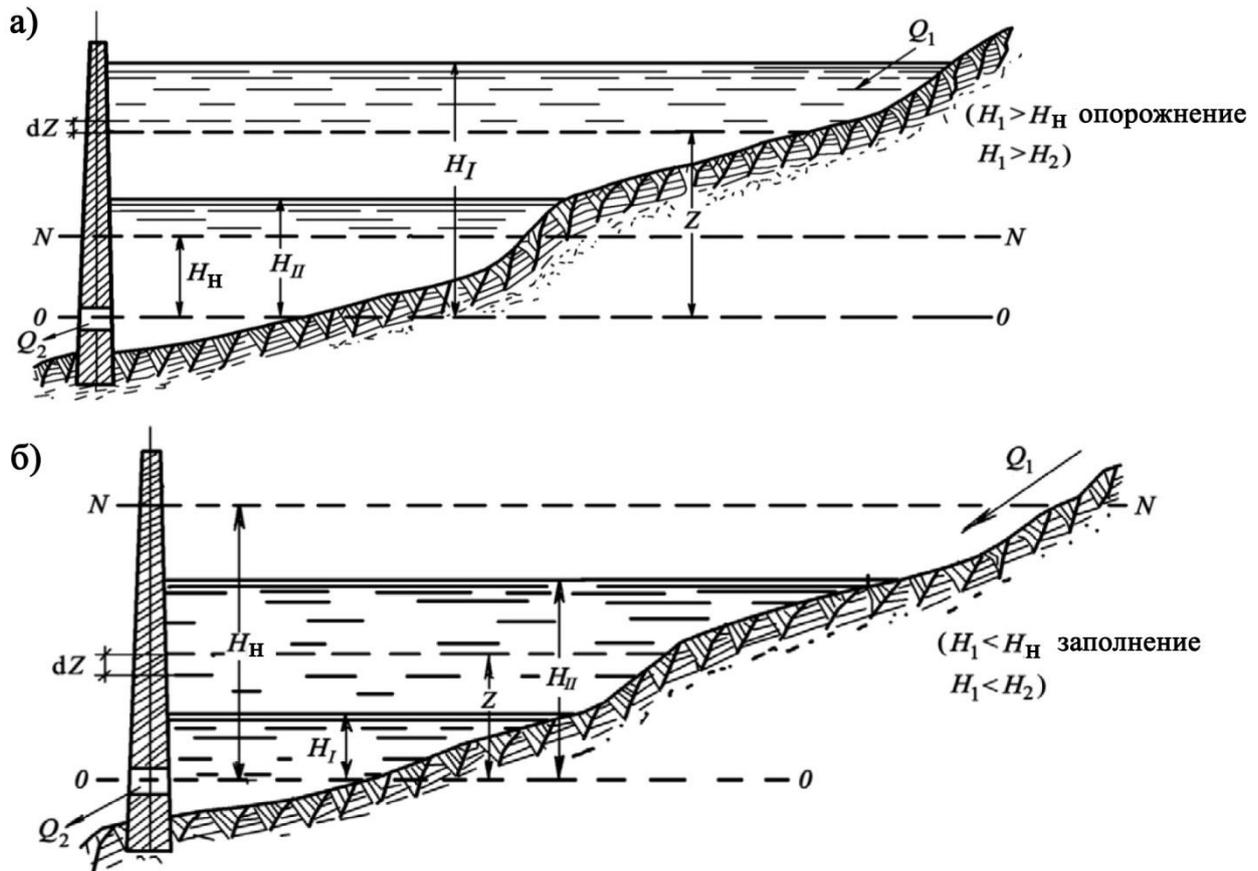


Рис. VIII.1.2. Схемы профилей опорожнения (а) и наполнения (б) водохранилища
 H_1 – значение начального уровня, H_2 – значение расчетного уровня,
 H_N – значение «нормального» уровня

Основная дифференциальная зависимость опорожнения (наполнения) при переменном напоре на поверхность водохранилища имеет вид:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_1 - \mu\omega\sqrt{2gZ}}{F}, \quad (\text{VIII.1.2})$$

где $Q_1 = f(t)$, (VIII.1.3)

$$F = f(Z), \quad (\text{VIII.1.4})$$

При наполнении водохранилища $H_2 > H_1$, $dZ > 0$, (VIII.1.5)

При опорожнении водохранилища $H_2 < H_1$, $dZ < 0$. (VIII.1.6)

Для практических случаев интегрирование дифференциального уравнения (VIII.1.1) проводят приближенным методом расчетов [И. Иорданишвили, И. Иремашвили, К. Иорданишвили, М. Мгебришвили, И. Купарашвили, Г. Натрошвили, Д. Поцхверия, Н. Канделаки, Л. Биланишвили, 2021 (на грузинском языке)].

Расчет времени истечения (наполнения) из водохранилища осуществляется при условии:

$$Q_1 = \text{const}, \quad (\text{VIII.1.7})$$

$$F = f(Z). \quad (\text{VIII.1.8})$$

Уравнение (VIII.1.2) записывается в виде квадратуры:

$$t_2 - t_1 = T = \int_{H_1}^{H_2} \frac{F dZ}{Q_1 - \mu \omega \sqrt{2gz}}, \quad (\text{VIII.1.9})$$

где интеграл (VIII.1.9) зависит только от переменной (Z). В случае истечения воды рассчитывают значение напора (H_n), при котором через отверстие вытекает постоянный поток расходом - $Q_2 = \text{const}$, а значение H_n рассчитывают из условия:

$$Q_2 = \mu \omega \sqrt{2gH_n} = \text{const}, \quad (\text{VIII.1.10})$$

Откуда
$$H_n = \frac{(Q_2)^2}{2g\mu^2\omega^2}, \quad (\text{VIII.1.11})$$

где H_n - т.н. «нормальный» напор, а N — «нормальный» уровень.

В соответствии с H_n и H_1 имеем моменты наполнения или опорожнения водохранилища:

при наполнении –
$$H_1 < H_n, \quad (\text{VIII.1.12})$$

при опорожнении –
$$H_1 > H_n. \quad (\text{VIII.1.13})$$

В обоих случаях "нормальный" напор постоянный.

Методика практического расчета

времени опорожнения или наполнения водохранилища (T)

Значение времени (T) опорожнения водохранилища рассчитывается при понижении горизонта в водохранилище от (H_1) до (H_n) (рис. VIII.1.2а), а при наполнении – при поднятии от (H_1) до (H_n) (рис. VIII.1.2б).

В уравнение (VIII.1.9): $t_2 - t_1 = T = \int_{H_1}^{H_2} \frac{F dZ}{Q_1 - \mu \omega \sqrt{2gz}}$, вставим значение Q из уравнения (VIII.1.11) – $H_n = \frac{Q_1^2}{2g\mu^2\omega^2}$, откуда: $Q_1^2 = H_n \cdot 2g\mu^2\omega^2$, тогда

$$Q_1 = \mu \cdot \omega \sqrt{H_n \cdot 2g}$$

Уравнение (VIII.1.9) при наполнении водохранилища примет вид:

$$t_1 - t_2 = T_{\text{зап.}} = \frac{1}{\mu \omega \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{F dZ}{\sqrt{H_n - \sqrt{Z}}}, \quad (\text{VIII.1.14})$$

При опорожнении водохранилища:

$$t_1 - t_2 = T_{\text{опор.}} = \frac{1}{\mu \omega \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{F dZ}{\sqrt{\sqrt{Z} - H_n}}, \quad (\text{VIII.1.15})$$

Если обозначить

$$Z_{\text{max.}(H_2 > H_1)\text{зап.}} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{F dZ}{\sqrt{H_n - \sqrt{Z}}}, \quad (\text{VIII.1.16})$$

который представляет собой т.н. «модуль» наполнения водохранилища водой, тогда «модуль» опорожнения будет:

$$Z_{\text{max.}(H_1 > H_2)\text{опор.}} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{F dZ}{\sqrt{\sqrt{Z} - H_n}}, \quad (\text{VIII.1.17})$$

Тогда время полного наполнения водохранилища с учетом уравнения (VIII.1.15) и «модуля» наполнения ($Z_{\text{max.нап.}}$) составит:

$$T_{\text{нап.}} = \frac{1}{\mu \omega \sqrt{2g}} \cdot Z_{\text{max.нап.}} \quad (\text{VIII.1.18})$$

С учетом «модуля» опорожнения ($Z_{\text{max.опор.}}$) – время полного опорожнения

водохранилища ($T_{\text{опор.}}$) составит:

$$T_{\text{опор.}} = \frac{1}{\mu\omega\sqrt{2g}} \cdot Z_{\text{max опор.}} \quad (\text{VIII.1.19})$$

Пример расчета времени опорожнения Сионского водохранилища ($T_{\text{опор.}}$) (при НПУ)

Исходными данными, необходимыми для расчета времени опорожнения Сионского водохранилища, являются:

- схема Сионского водохранилища (рис. V.2.6);
- процесс опорожнения водохранилища осуществляется без катастрофического водосброса, т.к. перелив воды через него осуществляется при более высокой отметке НПУ;
- график площади поверхности (F) и отметок глубины (Z) Сионского водохранилища (рис. V.2.7);
- среднегодовой расход воды, поступающей из р. Иори в водохранилище – $Q_1=11,6 \text{ м}^3/\text{с}$;
- расход воды, истекающей через энергетическое отверстие $Q_{2\text{ эн}} = 23,0 \text{ м}^3/\text{с}$;
- расход воды из ирригационного отверстия $Q_{2\text{ ир.}} = 24,0 \text{ м}^3/\text{с}$;
- суммарный расход воды из энергетического и ирригационного отверстий $Q_2=47,0 \text{ м}^3/\text{с}$;
- площадь энергетического отверстия $\omega_{\text{эн}}=6,15 \text{ м}^2$;
- площадь ирригационного отверстия $\omega_{\text{ир.}}=28,3 \text{ м}^2$;
- общая площадь энергетического и ирригационного отверстий:
 $\omega_{\text{сум.}}=6,15+28,3\approx 34,5 \text{ м}^2$;
- коэффициент расходов $\mu=0,60$;
- максимальное значение напора на водопропускное отверстие:
 $\nabla H_1 = 1068,3 - \nabla 1010,0=58,3 \text{ м}$;
- конечный напор на входное отверстие: $H_2=0$.

Так как график Сионского водохранилища $Z=f(F)$ почти прямолинейный (рис. V.2.7), что соответствует графику горных водохранилищ, то и процесс опорожнения также линейный (т.е. прямо пропорциональный). Величина так называемого «нормального» напора (H_n) по формуле (VIII.1.11) составит:

$$H_n = \frac{(Q_2)^2}{2g\mu^2\omega^2} = \frac{47,0^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,60^2 \cdot 34,5^2} = 0,26 \text{ м.}$$

Тогда по формуле (VIII.1.19) время полного опорожнения водохранилища (T) составит:

$$\begin{aligned} T_{\text{опор.}} &= \frac{1}{\mu\omega} \cdot Z_{\text{max опор.}} = \frac{1}{\mu\omega_{\text{сум.}}} \cdot \int_{H_1}^{H_2} \frac{F dZ}{\sqrt{H_n} - \sqrt{Z}} = \\ &= \frac{1}{0,6 \cdot 36,6} \cdot \int_0^{63,3} \frac{10,5 \cdot 10^6}{\sqrt{0,26} - \sqrt{Z}} dZ \approx 2100000 \text{ сек} \approx 24 \text{ суток} \end{aligned}$$

Т.о., для полного опорожнения Сионского водохранилища от НПУ до нижней отметки отверстия необходимо 24 суток. В 2007 году было проведено полное опорожнение Сионского водохранилища, которое (по нашим расчетам) заняло 24 суток.

Если необходимо опорожнить (или наполнить) водохранилище не полностью, то

расстояние между начальным и конечным уровнями будет разбито на (n) интервалов. Время опорожнения (наполнения) (T) вычисляется с помощью математического интеграла многих слагаемых. В этом случае для расчета необходимо расстояние между начальным и конечным напорами разделить на равные интервалы, тогда уравнение (VIII.1.16) примет вид:

$$Z_{\text{нап.}} = - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{F}{\sqrt{H_H} - \sqrt{Z}} \right)_{k+1} + \left(\frac{F}{\sqrt{H_H} - \sqrt{Z}} \right)_k \right] \cdot \delta Z_{K_1 K+1}, \quad (\text{VIII.1.20})$$

а уравнение (VIII.1.17) будет:

$$Z_{\text{опор.}} = - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{F}{\sqrt{Z} - \sqrt{H_H}} \right)_{k+1} + \left(\frac{F}{\sqrt{Z} - \sqrt{H_H}} \right)_k \right] \cdot \delta Z_{K_1 K+1}, \quad (\text{VIII.1.21})$$

где функции $\left(\frac{F}{\sqrt{H_H} - \sqrt{Z}} \right)_{k+1}$ и $\left(\frac{F}{\sqrt{Z} - \sqrt{H_H}} \right)_k$ – значения интегралов формул (VIII.1.16) и (VIII.1.17) при соответствующих (Z_{k+1}) и (Z_k) напорах; $K=1,2,3\dots n$; $Z_1=H_1$; $Z_{n+1}=H_2$; $\delta Z_{K,K+1}$ – прирост положительного или отрицательного напора при подъеме или опускании водного горизонта от отметки давления (Z_k) до отметки (Z_{k+1}).

Значение формул (VIII.1.20) и (VIII.1.21) всегда положительное.

По формуле (VIII.1.20), в соответствии с расчетным значением (Z), по формуле (VIII.1.18) можно определить время наполнения ($T_{\text{макс.нап.}}$), в течение которого горизонт водохранилища вырастет с (H_1) до (H_2):

$$T_{\text{макс нап.}} = \frac{Z_{\text{макс нап.}}}{\mu \omega \sqrt{2g}} \quad (\text{VIII.1.22})$$

а по формуле (VIII.1.19) – можно определить время опорожнения ($T_{\text{макс.опор.}}$), в течение которого горизонт водохранилища будет опускаться с (H_1) до (H_2):

$$T_{\text{макс опор.}} = \frac{Z_{\text{макс опор.}}}{\mu \omega \sqrt{2g}}. \quad (\text{VIII.1.23})$$

Скорость процесса опорожнения водохранилища следует определять с учетом состава грунта на берегах водохранилища, чтобы не активизировать размыв берегов за счет процессов подъема воды из грунта.

VIII.2. МЕРОПРИЯТИЯ ПРОТИВ РАЗВИТИЯ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЧИСТКЕ ДНА ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Анализ эксплуатации горных и предгорных водохранилищ показал, что седиментационные процессы в них протекают более интенсивно, чем на равнинных водохранилищах. Эта проблема актуальна в Закавказье, Средней Азии и других горных районах.

При проектировании горных водохранилищ необходимо заранее определить в годовых стоках горных рек – как их значительную неравномерность, так и показатели насыщения воды твердыми частицами. Мероприятия по снижению процессов седиментации можно разделить на две группы – **предупредительные** и **эксплуатационные**.

Предупредительные меры – общее снижение объема наносов, поступающих в водохранилище, за счет уменьшения эрозии почвы в бассейне реки. Это – мероприятия по

посадке леса в истоках реки, расчет водоохранной зоны и полосы водохранилищ, рек и др.

Эксплуатационные мероприятия: – промывки дна водохранилища через донные галереи; механическая очистка; увеличение отметки гребня плотины с целью увеличения объема водохранилища; транзитный сброс воды через боковые водоотводы – водоводные каналы, туннели, устройства для удаления наносов; создание берегоукрепительных сооружений и др.

При изучение условий эксплуатации ряда водохранилищ в **Швейцарии** было выявлено, что промывочные галереи на дне плотины на глубине 200,0 м до сих пор работают в нормальном режиме. Основным недостатком этого способа является образование узкого глубокого русла на дне водохранилища у плотины, при этом основная часть дна водохранилища остается заиленной.^{*)}

Необходимо отметить предложенные грузинскими учеными сооружения для удаления наносов, которые могут располагаться в головной части водохранилища [Херхеулидзе Г. И., 1972; Г. Гавардашвили, Э. Кухалашвили, Ш. Купрейшвили, Н. Гавардашвили, 2018 (на грузинском языке)].

Интересным предложением по очистке горных водохранилищ от наносов является размещение головной части сбросных сооружений (в виде водозаборной башни) в русле реки между нормальным уровнем водохранилища и уровнем мертвого объема (рис. VIII.2.1) [Мамедов А.Ш., Мамедли А.А., 2016]. В условиях горных рек, где мутность наносов высокая, такой тип наносодерживающих сооружений очень быстро заиляется. Также интересное предложение – удаление наносов перед плотиной с помощью подводного наносоуловителя (рис.VIII.2.2) [Мамедов А.Ш., Мамедли А.А., 2016].

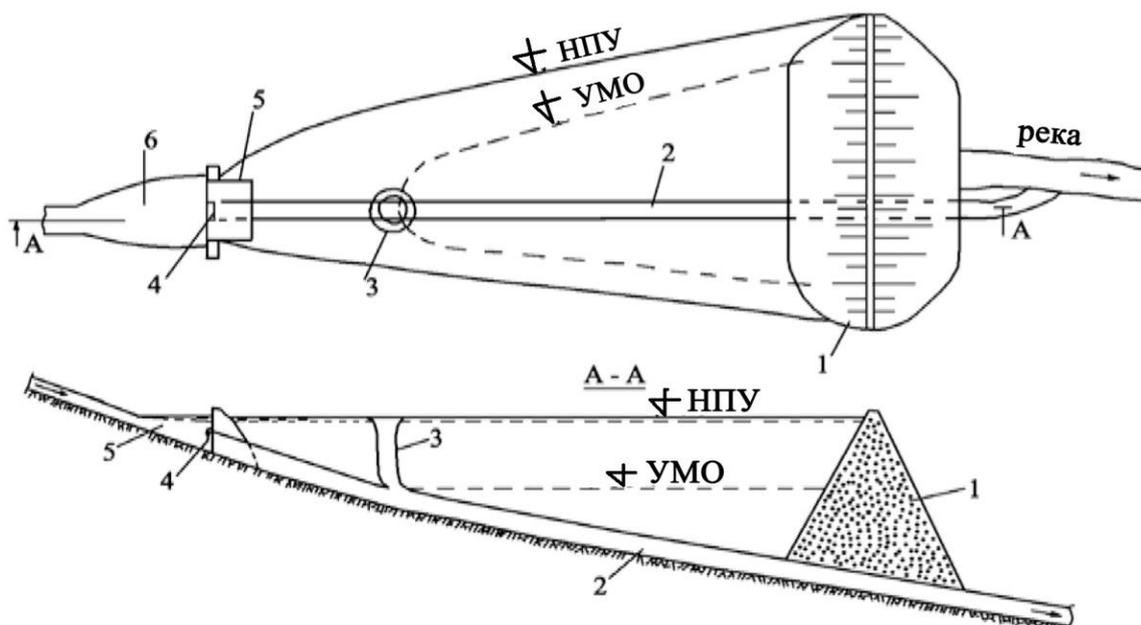


Рис. VIII.2.1. Сооружение для удаления наносов на дне горных водохранилищ

*) Экологические проблемы крупных горных водохранилищ Швейцарии и Италии были исследованы Н. Канделаки во время командировки в Швейцарию, Италию, которая финансировалась Национальным научным фондом Руставели по программе MR-2016-1-106.

1 – плотина, 2 – донные трубы, 3 – поверхностный водосброс, 4 – донный водозабор, 5 – нанососдерживающая плотина, 6 – бассейн для предварительного отстоя наносов.

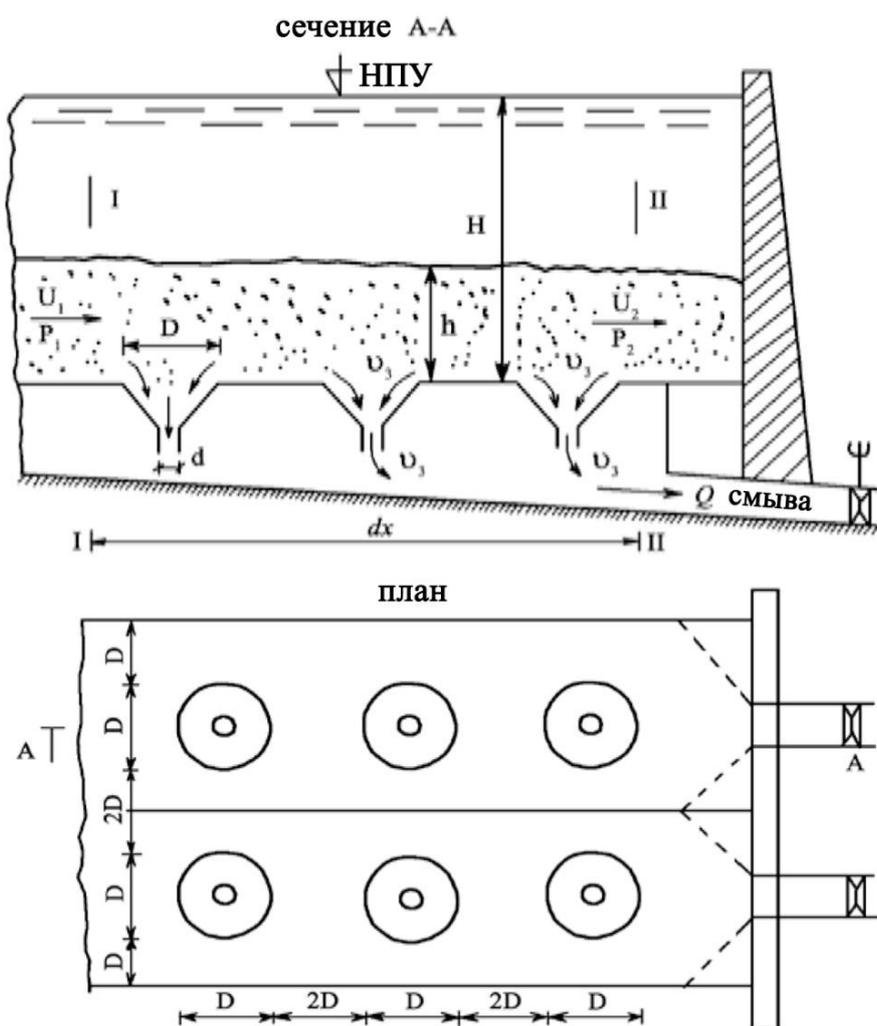


Рис. VIII.2.2. Схема подводного отстойника

Промывочные галереи устроены на дне плотин горных водохранилищ Грузии. Регулярная гидропромывка водохранилищ в Грузии не проводится, из-за чего некоторые из них заилены отложениями, такие как: Гуматское, Ладжанурское, Варцихское. Дно Ткибульского водохранилища покрыто угольным шламом; вода в начале и в середине Тбилисского водохранилища загрязнена ядохимикатами и минеральными удобрениями [Ш. Купреишвили, Т. Супаташвили, К. Дадиани, Х. Кикнадзе, Л. Майсая, 2012; Р. Диаконидзе, Г. Чахаия, Л. Цулукидзе, З. Варазашвили, Т. Супаташвили, Ш. Купреишвили, Ш. Мтиулишвили, 2013 (на грузинском языке)], хотя для питьевого водоснабжения вода достаточно чистая, т.к. в этом створе проводили очистные работы.

В 2012 году была проведена гидропромывка дна Ладжанурского водохранилища. Но положительного эффекта это не имело, так как осадок уже был загипсован и направленный поток воды не смог его размыть (фото VIII.2.1).

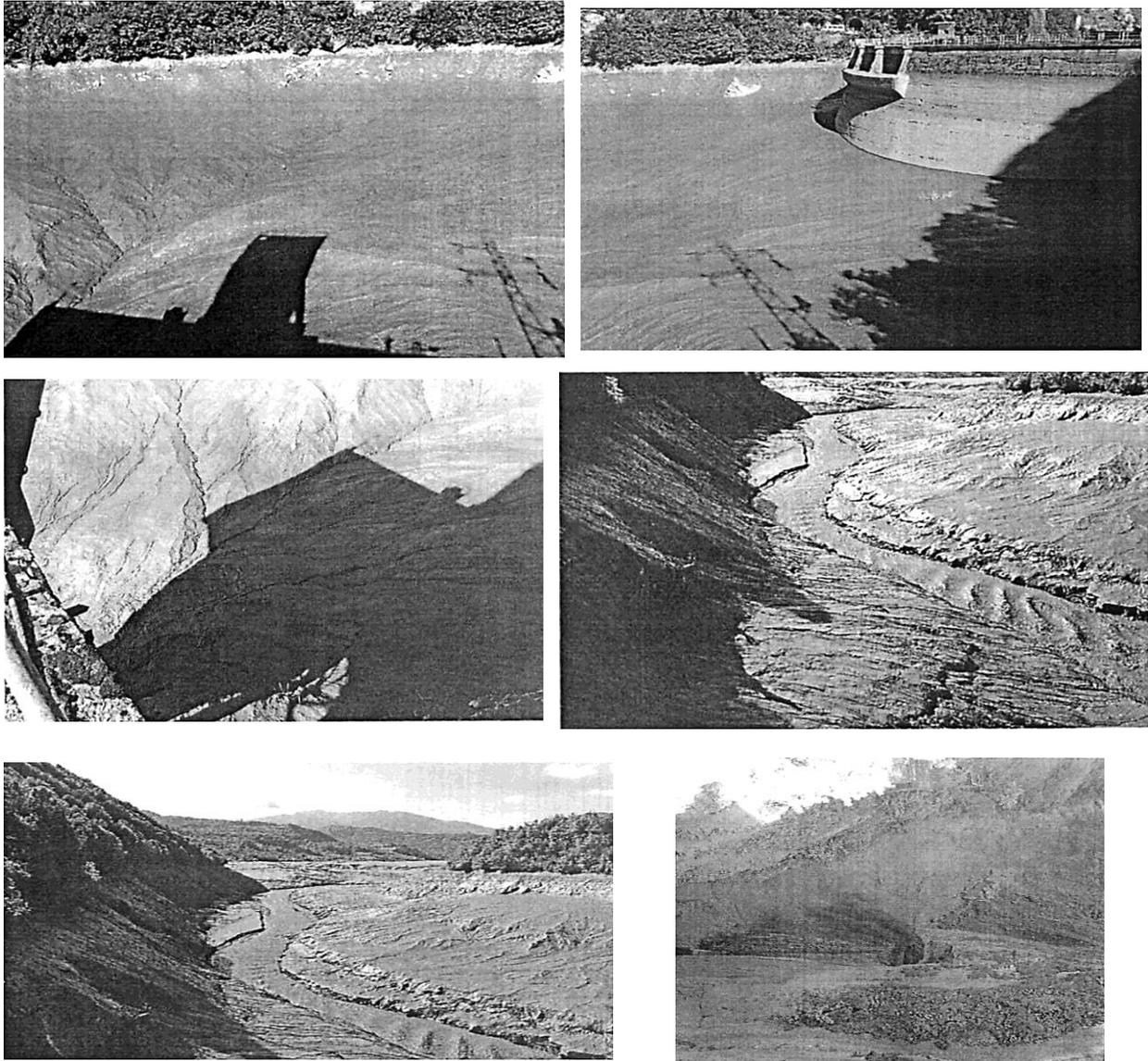


Фото VIII.2.1. Процесс гидравлической промывки донных отложений Ладжанурского водохранилища, 2012 г.

Рекомендации по очистке дна водохранилища от наносов

Для очистки дна водохранилища от наносов необходимо провести следующие работы:

а) Подготовительные работы:

1. Изыскание проектного плана и профилей дна водохранилища;
2. Для определения количества наносов, накопившихся на дне водохранилища, через каждые 100×100 м следует провести эхолотирование его дна и составить современные профили дна;
3. Расчет накопленного объема наносов (W_n , м³) путем сравнения проектного и современного профилей;
4. Для определения толщины осадка (d_n) и его удельного веса (γ_n) взять пробы грунта со дна и рассчитать гранулометрический состав.

б) Процесс смыва наноса со дна водохранилища:

1. Понижение уровня водохранилища до уровня мертвого объема. Скорость снижения

уровня водохранилища не должна превышать 1,0 м/сут. Процесс опорожнения желательно проводить до начала периода весеннего половодья;

2. Измерение фактической площади поперечного сечения ($\omega_{\text{факт.}}$, м²), уклона ($i_{\text{факт.}}$) и длины ($\ell_{\text{факт.}}$, м) водосброса;
3. Измерение фактической скорости потока воды в водосбросе ($V_{\text{факт.}}$, м/с) проводят при соответствующей расчетной отметке уровня водохранилища;
4. Сравнение фактической скорости воды в канале ($V_{\text{факт.}}$, м/с) и критической (неосаждающей) скорости ($V_{\text{кр. неос.}}$) воды, насыщенной наносами.

Удаление наносов должно осуществляться с соблюдением следующих условий:

$$V_{\text{факт.}} > V_{\text{кр. неос.}} \quad (\text{VIII.2.1})$$

Критическая скорость неосаждения наноса в русле ($V_{\text{кр. неос.}}$) рассчитывается по фактической скорости течения воды ($V_{\text{факт.}}$), среднего диаметра наносов ($d_{\text{ср}}$, мм) и уклону (i) сбросного канала. В частных случаях допускается применение формулы А.А. Черкасова [Киселев П.Г., 1972]:

$$V_{\text{кр. неос.}} = 0,646 \alpha \beta R^{0.5} \text{ м/с}, \quad (\text{VIII.2.2})$$

где α – коэффициент, значение которого зависит от ($Ri \cdot 10^6$) (табл. VIII.2.1); R (м) – гидравлический радиус отводящего канала; i – уклон отводящего канала; β – коэффициент, значение которого зависит от гидромеханического эквивалента наносов (η) (табл. VIII.2.2).

Таблица VIII.2.1

Значения α

$Ri \cdot 10^6$	α	$Ri \cdot 10^6$	A	$Ri \cdot 10^6$	A
50	0,97	200	0,995	350	1,015
75	0,975	225	1,00	400	11,02
100	0,98	275	1,005	450	1,095
125	0,985	300	1,01	500	1,03
150	0,99				

Таблица VIII.2.2

Значения η и β

η , гр-см/л-сек	β	η , гр-см/л-сек	B	η , гр-см/л-сек	β
0,001	0,735	0,2	0,950	1,5	1,075
0,01	0,815	0,3	0,975	2,0	1,090
0,2	0,840	0,4	0,990	3,0	1,120
0,03	0,860	0,5	1,005	4,0	1,140
0,04	0,870	0,6	1,015	5,0	1,160
0,05	0,880	0,7	1,025	7,0	1,180
0,06	0,880	0,8	1,030	10,0	1,215
0,08	0,900	0,9	1,040	15,0	1,250
0,10	0,915	1,0	1,045	20,0	1,270
0,15	0,935				

Значение η рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{\gamma_1 - \gamma_B}{\gamma_1} \cdot \varepsilon \frac{\sum(\omega_i \cdot P_i)}{\sum P_i}, \quad (\text{VIII.2.3})$$

где γ_B , γ_1 – удельный вес воды и наносов; ε – мутность потока в русле (количество наносов в 1,0 л насыщенного наносами потока, в граммах); ω_i – осредненная гидравлическая крупность частиц наносов i -й степени, см/с; P_i – количество наносов этой фракции, %.

VIII.3. МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ РАЗМЫВА АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Защита абразионных берегов водохранилищ с помощью современных, высокой волногасящей способностью берегоукрепительных сооружений является актуальной задачей.

Во многих странах уже отказались от использования массивных, дорогостоящих берегозащитных сооружений. Созданы бетонные конструкции весом от 0,5 до 60,0 т (рис. VIII.3.1; Фото VIII.3.1; VIII.3.2; VIII.3.3; VIII.3.4) [Шеренков И.А., Складнев М.Ф., 1971; Иорданишвили И.К., 2002; Литвиненко Г.И., Стрекалов С.С., 2002; Bilyway E., Ozbachsesi B., Vacanlı S., Kiziroglu C., 2017; Soares F., Henrigues M.I., Roca C., 2017].



Фото VIII.3.1. Тетраподы у моста на реке Лиахви (Грузия)

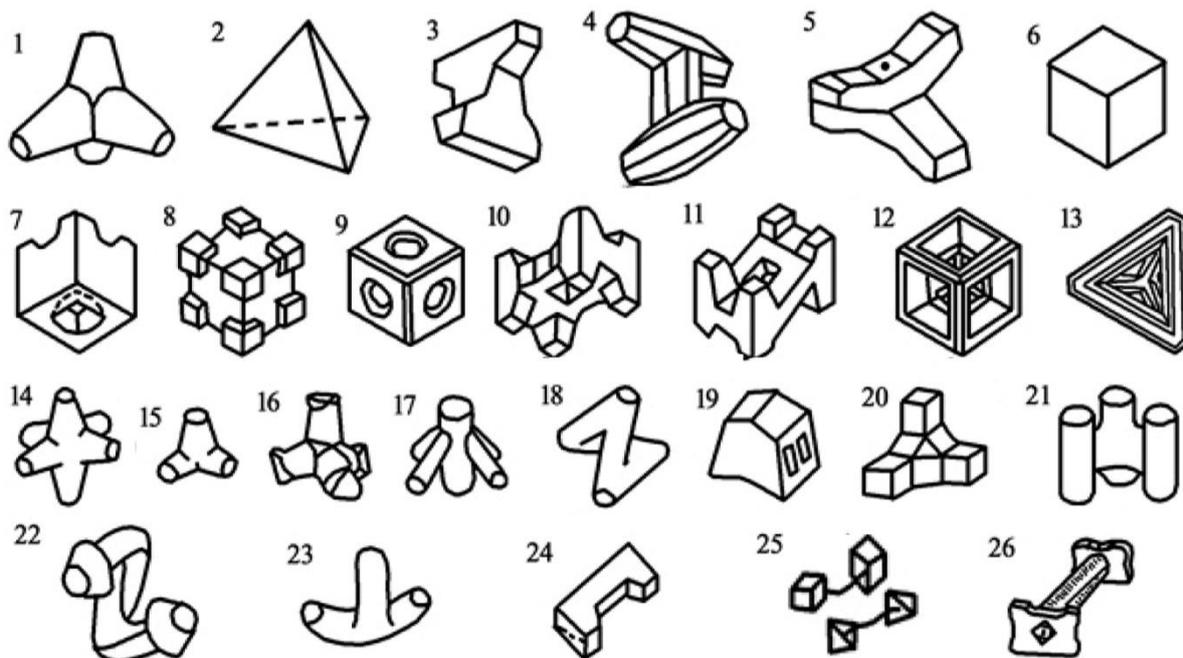


Рис. VIII.3.1. Основные существующие типы фигурных массивов
 1 – тетрапод; 2 – тетраэдр; 3 – дипод; 4 – долос; 5 – тип МЦ;
 6 – кубус; 7 – модифицированный кубус; 8 – блок ВНЗ; 9 – стиблок;
 10 – Н-образный блок; 11 – И-образный блок; 12 – КОБ-блок; 13 – полый тетраэдр;
 14 – гексапод; 15 – квадрипод; 16 – стабиллопод; 17 – стапод; 18 – стабит;
 19 – свиблок; 20 – трипод; 21 – трибар; 22 – динозавр; 23 – артилис;
 24 – П-блок; 25 – связанные блоки; 26 – гантелеобразный блок.



Фото VIII.3.2. Насыпь из тетраблоков в Потийском порту (Грузия)



Фото VIII.3.3. Укрепление абразионного берега
 многорядной конструкцией (США)



Фото VIII.3.4. Тетраподы в Анаклии (Грузия)

Используя фигурные массивы, можно укрепить абразионные крутые откосы. Основным фактором эффективной эксплуатации сооружений из фигурных массивов является уменьшение волновой энергии и высоты наката волн на откос (в 2-3 раза).

Новые берегоукрепительные конструкции - в виде фасонных блоков

С целью повышения волногасящей способности, улучшения их сцепления между собой и уменьшения высоты наката волн на откос при финансовой поддержке Национального научного фонда Грузии им. Шота Руставели (№ FR- 21-2942) научными сотрудниками разработан ряд **новых типов фасонных блоков** – на два из которых в 2025 г. получены патентные свидетельства Грузии - «Модифицированный гексаблок» и «Модифицированный тетраблок» (название выбрано по количеству их ребер (греч. тетра – «четыре»; Εξι – «шесть») (рис. VIII.3.2; VIII.3.3) [Н. Канделаки, И. Иорданишвили, И. Иремашвили, Ш. Купреишвили, К. Иорданишвили, 2019; И. Иорданишвили, 2001; Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Канделаки Н., патентные свидетельства U 2025 2210 Y и U 2025 2211 Y (на грузинском языке); Иорданишвили И.К., 2000, 2003; Kandelaki N., Iordanishvili I., Iremashvili I., Ujma A., Shurgaia V., Iordanishvili K., 2019; Iordanishvili I., Kandelaki N., Iremashvili I., Iordanishvili K., 2024; Kandelaki N., Iordanishvili K., Iordanishvili I., Iremashvili I., Bilanishvili L., 2025].

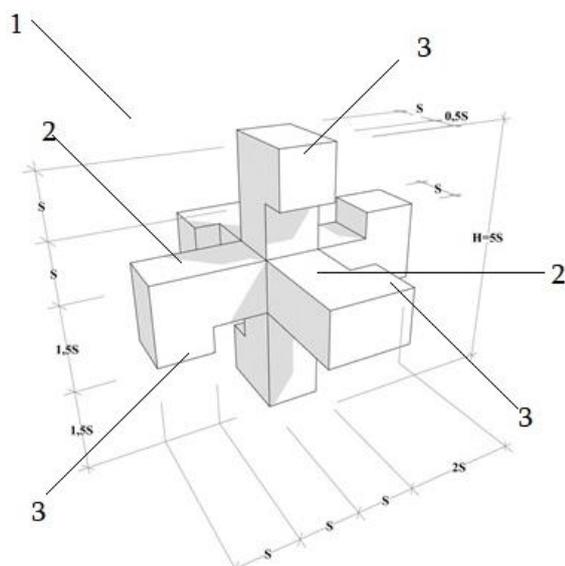


Рис. VIII.3.2. Схема «Модифицированного гексаблока», где 1 – волногасящее берегоукрепление в виде гексаблока (U 2025 2211 Y); 2 – три призмы прямоугольного сечения, соединяемые между собой под углом 90°; 3 – Г-образные выступы.

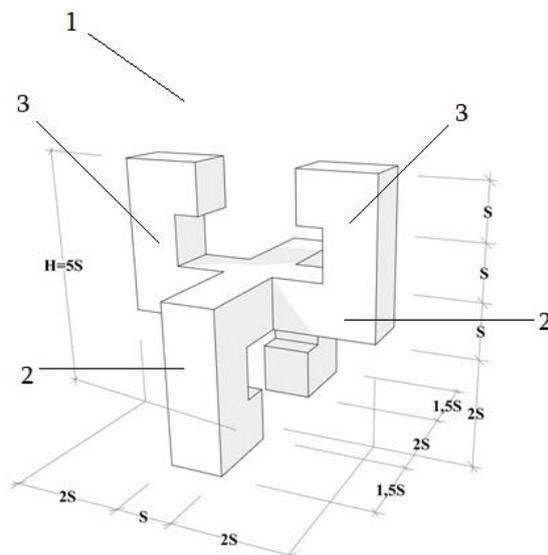


Рис. VIII.3.3. Схема «Модифицированного тетраблока», где 1 – волногасящее берегоукрепление в виде тетраблока (U 2025 2210 Y); 2 – две призмы прямоугольного сечения, соединяемые между собой под углом 90°; 3 – Г-образные выступы.

Сравнение массы предлагаемых блоков – «Модифицированного гексаблока», «Модифицированного тетраблока» и существующих массивов – «тетрапод», «дипод» и «долос» приведено на рисунке VIII.3.4.

а)

Модифицированный гексаблок, $\rho = 2,60 \text{ т/м}^3$		
$M, \text{ т}$	0,21	1,64
$H, \text{ м}$	0,75	1,50
$S, \text{ м}$	0,22	0,44
$V, \text{ м}^3$	0,08	0,63

Модифицированный тетраблок, $\rho = 2,60 \text{ т/м}^3$		
$M, \text{ м}$	0,21	1,70
$H, \text{ м}$	0,97	2,11
$H_2, \text{ м}$	0,61	1,33
$S, \text{ м}$	0,18	0,39
$V, \text{ м}^3$	0,064	0,65

б)

Тетрапод, $\rho = 2,60 \text{ т/м}^3$		
$M, \text{ м}$	1,00	6,00
$H, \text{ м}$	1,30	2,30
$d, \text{ м}$	0,30	0,60
$D, \text{ м}$	0,50	1,01
$S, \text{ м}$	0,60	1,10
$b_1, \text{ м}$	1,07	1,95
$b_2, \text{ м}$	0,75	1,40
$\text{tg}\alpha$	0,22	0,22

Дипод, $\rho = 2,60 \text{ т/м}^3$		
$M, \text{ м}$	1,00	6,00
$H, \text{ м}$	1,20	2,20
$b_1, \text{ м}$	0,41	0,76
$b_2, \text{ м}$	0,26	0,48
$h, \text{ м}$	0,75	1,40
$l, \text{ м}$	0,28	1,52
$l_2, \text{ м}$	0,45	0,82
$L_4, \text{ м}$	0,57	1,04

Долос, $\rho = 2,60 \text{ т/м}^3$		
$M, \text{ м}$	1,00	6,00
$H, \text{ м}$	1,38	2,50
$b_1, \text{ м}$	0,43	0,80
$b_2, \text{ м}$	0,28	0,51
$b_3, \text{ м}$	0,11	0,81
$h, \text{ м}$	0,18	0,33
$l, \text{ м}$	0,27	0,49
$d, \text{ м}$	0,30	0,55

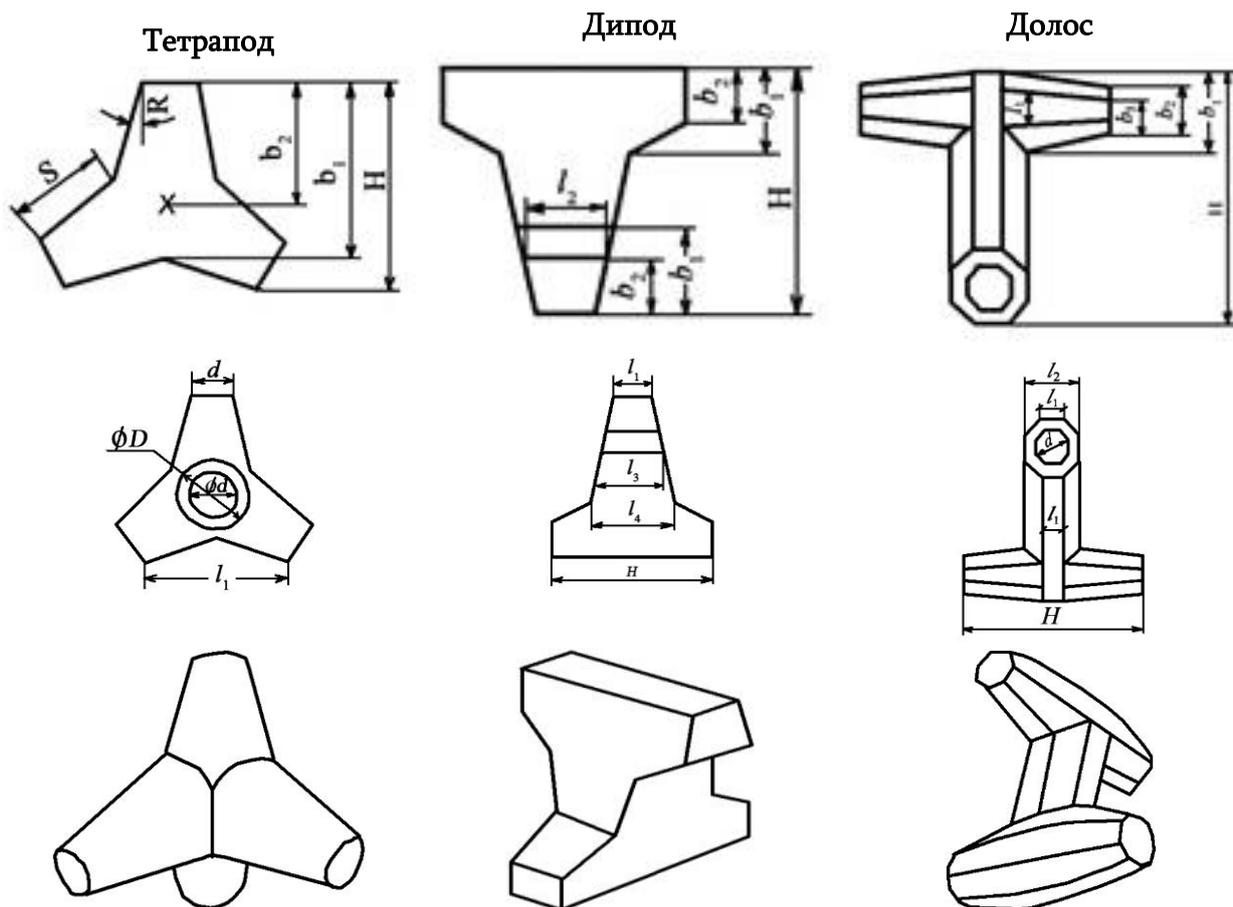


Рис. VIII.3.4. Фигурные массивы:

а) Модифицированный гексаблок, Модифицированный тетраблок, б) схемы «тетрапода», «дипода», «долоса» и их характеристики (ρ – плотность бетона, т/м³)

Для определения наиболее эффективных размеров и формы наброски из предлагаемых «Модифицированного тетраблока» и «Модифицированного гексаблока» в Институте водного хозяйства им. Ц.Е. Мирцхулава проведены лабораторные исследования по определению волновой нагрузки и высоты наката гребней волн ($h_{\text{run up}}$) на откос (фото VIII.3.5).



Фото VIII.3.5. Общий вид гидравлического лотка (10,0×0,3×0,7 м)

Расчет верхней границы наброски из «Модифицированных гексаблоков» на откосе осуществляется по следующему соотношению:

$$h_{\text{run up, max (мод.гекс.)}} = k_{\text{(мод.гекс.)}} \cdot k_w \cdot k_{\text{run up (град.)}} \cdot h, \quad (\text{VIII.3.1})$$

где $k_{(мод.гекс.)} = 0,60$ – коэффициент шереховатости откоса, укрепленного «Модифицированными гексаблоками», значение которых установлено на основании лабораторных исследований - соотношением высоты наката волн на откосе $h_{гип\ up, max (мод.гекс.)}$, укрепленном «Модифицированными гексаблоками» на высоту наката волн на гладкий откос ($h_{гип\ up-глад.}$) – $k_{(мод.гекс.)} = \frac{h_{гип\ up(мод.гекс.)}}{h_{гип\ up\ глад.}} = 0,60$ (Фото VIII.3.6); $k_w = 1,5$ – коэффициент, его значение, согласно строительным нормам, зависит от скорости ветра и крутизны откоса; $k_{гип\ up(глад.)}$ – значение коэффициента зависит от крутизны волны (λ/h) на гладкий откос и крутизны откоса (α°). Тогда ($h_{гип\ up-мод.гекс.}$)= $0,60 \cdot 1,5 \cdot 10,0=0,90$ м.



Фото VIII.3.6. Модель наброски из «Модифицированных гексаблоков»



Фото VIII.3.7. Исследование эффективности волногашения наброски на откосе с «Модифицированными гексаблоками» в гидравлическом лотке (10,0×0,3×0,70 м)

Расчет верхней границы наброски с «Модифицированными тетраблоками» на откос идентичен расчету «Волногасящих Гексаблоков». Исходя из лабораторных исследований, высота наката волн на откос с «Модифицированными тетраблоками» составит:

$$h_{\text{тип up мод.тетр.}} = 0,55 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 10,0 = 0,83 \text{ м,}$$

Т.о., высота наката гребней волн на откосе, укрепленном «Модифицированными тетраблоками», на 0,07 м (8%) меньше, чем на откос, укрепленном «Модифицированными гексаблоками» (фото VIII.3.8; VIII.3.9; рис. VIII.3.6) .



Фото VIII.3.8. Модель наброски из «Модифицированных тетраблоков»



Фото VIII.3.9. Исследование эффективности волногашения наброски на откосе с «Модифицированными тетраблоками» в гидравлическом малом лотке (10,0×0,3×0,70 м)

Оптимальная масса модифицированного блока (M) записывается в виде универсального соотношения [Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Джавахишвили Л.Г., 2010]:

$$M = \frac{0,0165 \rho_m h^3}{(\rho_m - \rho)^3 \text{ctg} \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{h}} \quad (\text{VIII.3.2})$$

где 0,0165 – значение универсального коэффициента, который зависит от плотности блоков; ρ_m, ρ – плотность блоков и воды; h, λ – высота и длина волны; α – угол наклона откоса (рис. VIII.3.5).

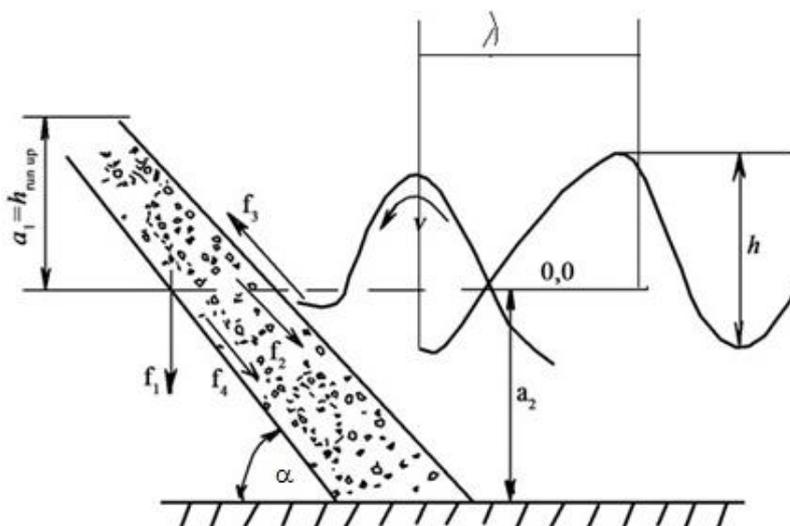


Рис. VIII.3.5. Схема факторов, определяющих устойчивость конструкции из наброски с «Модифицированными тетраблоками» и «Модифицированными гексаблоками»

В таблице (VIII.3.1) и на рисунке (VIII.3.6) приведены фактические и расчетные значения оптимальной массы массивов разных типов (Долос, Тетрапод, Трибар, Стабит, «Модифицированный гексаблок» и «Модифицированный тетраблок»).

Таблица VIII.3.1

Значения оптимальной массы (M) фасонных блоков

№	Расположение/тип блоков	Фактические значения							Расчетные значения, M, T
		H, м	h, м	λ, м	$\sqrt{\frac{\lambda}{h}}$	ctg α	M, T	Расчет по строит. нормам M, T	Формула (VIII.3.2) M, T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Гумбольдт (США)/ Долос	14,0	12,2	244	4,47	4,0	43,0	31	41
2	Ричард Бэй (Аравия)/ Долос	17,9	9,0	134	3,86	2,0	30,0	29	29

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	Хей-Пойнт (Австралия)/ Долос	10,0	6,1	90	3,84	2,0	10,0	9	9
4	Мина-Райсун (Оман)/ Долос	13,0	7,0	140	4,47	1,5	20,0	22	21
5	Ханс-Бей (Южная Аравия)/Долос	11,8	6,0	153	5,05	1,5	13,5	16	15
6	Южная Аравия/Долос	8,8	4,5	130	5,38	1,5	6,0	7	7
7	Кресент-Сити (США)/ Тетрапод						25,0	22	24
8	Гавайи/Трибар						17,8	16	17
9	Англия/стабит						25,0	23	24
10	Грузия/«Модифицированный гексаблок»	2,3	6,9	69	3,16	3,0		8,0	4,6
11	Грузия/«Модифицированный тетраблок»	2,3	6,9	69	3,16	3,0		7,8	4,4

Для исследования эффективности волногашения набросками из «Модифицированных гексаблоков» и «Модифицированных тетраблоков» в лабораторных условиях использован закон механического подобия, на основе которого сохранено геометрическое, кинематическое и динамическое подобие при соблюдении граничных и начальных условий.

Анализ и результаты сопоставления лабораторных исследований взаимодействия волн с «Модифицированными гексаблоками» и «Модифицированными тетраблоками», устойчивости блоков и эффекта гашения волновой энергии с соответствующими натурными данными представлены в таблице VIII.3.2 и на рисунке VIII.3.6.

Расчет оптимальной массы «Модифицированного гексаблока» и «Модифицированного тетраблока» осуществляется на основе стабилизирующих и действующих факторов с использованием теории подобия. Расчет проводится с учетом полученных определяющих параметров, а именно: M – масса «Модифицированного блока» (т); ρ_m – плотность материала «Модифицированного блока» (т/м³); α – угол наклона откоса (в градусах); h – высота волны (м); λ – длина волны (м); θ – угол подхода волн к берегу (в радианах); ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; μ – кинематическая вязкость воды (рис. VIII.3.6).

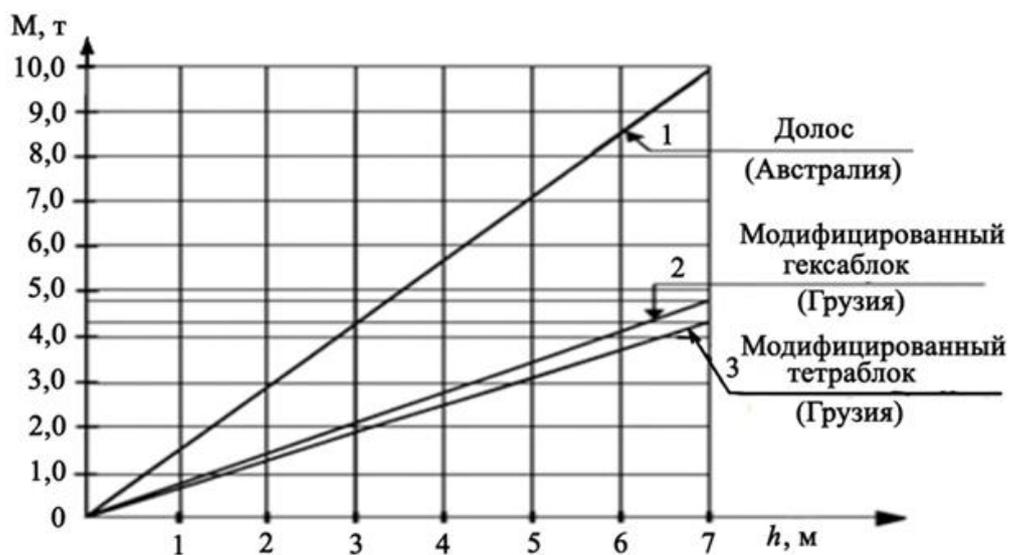


Рис. VIII.3.6. Зависимость расчетной массы блока (М) от высоты волны

Таблица VIII.3.2

Значения расчетных характеристик «Модифицированного гексаблока» для натуральных и модельных значений (для малого лотка $10,0 \times 0,3 \times 0,7$ м; $a_{L1}=30$)

$h_{\text{нат.}}/h_{\text{мод.}}$, м	5,00/0,16	5,70/0,19	6,90/0,23	7,50/0,25	8,10/0,27	8,40/0,28	9,00/0,30
$P_{\text{нат.}}/P_{\text{мод.}}$, кг	1,70/0,06	2,10/0,08	4,50/0,17	5,50/0,21	7,10/0,26	7,80/0,29	8,00/0,30
$M_{\text{нат.}}/M_{\text{мод.}}$, кг	1,80/0,07	2,20/0,08	4,60/0,17	5,90/0,22	7,40/0,27	8,00/0,30	8,30/0,31
$H_{\text{нат.}}/H_{\text{мод.}}$, м	0,40/0,01	0,45/0,015	0,55/0,018	0,60/0,02	0,65/0,022	0,68/0,023	0,73/0,024
$S_{\text{нат.}}/S_{\text{мод.}}$, м	0,52/0,017	0,63/0,021	0,75/0,025	0,83/0,028	0,90/0,031	0,95/0,032	1,0/0,033

где $h_{\text{нат.}}$, $h_{\text{мод.}}$ – высота волны соответственно на натуре и модели; $P_{\text{нат.}}$, $P_{\text{мод.}}$ – давление воды на модифицированные блоки; $M_{\text{нат.}}$, $M_{\text{мод.}}$ – масса модифицированного блока; $H_{\text{нат.}}$, $H_{\text{мод.}}$ – длина модифицированного блока; $S_{\text{нат.}}$, $S_{\text{мод.}}$ – ширина модифицированного блока.

До зоны обрушения волн (где процесс происходит в автомодельной зоне) расчет гидродинамических и физических лабораторных характеристик производится с использованием линейного моделирования и критерия Фруда (Fr), который предполагает равенство гравитационных сил ($a_n = H_{\text{нат.}}/H_{\text{мод.}}$). После зоны обрушения волн (где автомоделирование невозможно) высота волн на откосе и волновое давление рассчитываются на откосе с учетом масштабного поправочного коэффициента ($K=0,75$) (табл. VIII 3.3).

Проведенные исследования показали, что на откосе укрепленном предлагаемыми фигурными массивами высота наката гребней волн на откос на 40% ниже.

**Пересчет гидродинамических натуральных характеристик
«Модифицированного гексаблока» и «Модифицированного тетраблока»
в лаборатории (Используя критерий Фруда $F_r = \frac{v}{\sqrt{gH}}$, $g = \text{idem}$, $p = \text{idem}$)**

Физические величины	Масштабный линейный множитель $a_H = H_{\text{нат.}} / H_{\text{мод.}}$	Модельные величины до зоны обрушения волн	Модельные величины в зоне обрушения волны с учетом масштабного коэффициента, $K = 0,75$
1	2	3	4
Линейные величины			
h (высота волны), м	$a_h = a_H = h_{\text{нат.}} / h_{\text{мод.}}$	$h_{\text{мод.}} = h_{\text{нат.}} / a_H$	$h_{\text{мод.}} = h_{\text{нат.}} / a_H$
λ (длина волны), м	$a_\lambda = a_H = \lambda_{\text{нат.}} / \lambda_{\text{мод.}}$	$\lambda_{\text{мод.}} = \lambda_{\text{нат.}} / a_H$	$\lambda_{\text{мод.}} = \lambda_{\text{нат.}} / a_H$
$H_{\text{вод.}}$ (глубина воды), м	$a_B = a_H = H_{\text{нат.в.}} / H_{\text{мод.в.}}$	$H_{\text{мод.}} = H_{\text{нат.}} / a_H$	$H_{\text{мод.}} = H_{\text{нат.}} / a_H$
$H = 3,0 \cdot S^*$ (высота "Гексаблока"), м	$a_h = a_H = l_{\text{нат.}} / l_{\text{мод.}}$	$H_{\text{мод.}} = H_{\text{нат.}} / a_H$	$H_{\text{мод.}} = H_{\text{нат.}} / a_H$
Ω (площадь), м ²	$a_\Omega = a_H^2$	$\omega_{\text{мод.}} = \omega_{\text{нат.}} / a_H^2$	$\omega_{\text{мод.}} = \omega_{\text{нат.}} / a_H^2$
W (объем), м ³	$a_W = a_H^3$	$W_{\text{мод.}} = W_{\text{нат.}} / a_H^3$	$W_{\text{мод.}} = W_{\text{нат.}} / a_H^3$
$h_{\text{гун up}}$ (высота наката гребней волн на склон), м	$a_{\text{run} \rightarrow \text{up}} = a_H$	$h_{\text{гун up мод.}} = h_{\text{гун up нат.}} / a_H$	$h_{\text{гун up мод.}} = h_{\text{гун up нат.}} / a_H$
t (время, период), с.	$a_t = a_H^{1/2}$	$t_{\text{мод.}} = t_{\text{нат.}} / \sqrt{a_H}$	$t_{\text{мод.}} = t_{\text{нат.}} / \sqrt{a_H}$
V линейная скорость), м/с	$a_V = a_H^{1/2}$	$V_{\text{мод.}} = V_{\text{нат.}} / \sqrt{a_H}$	$V_{\text{мод.}} = V_{\text{нат.}} / \sqrt{a_H}$
α° (угол наклона), градусы	$a_\alpha = 1$	$a_{\text{мод.}} = a_{\text{нат.}}$	$a_{\text{мод.}} = a_{\text{нат.}}$
M (масса), т	$a_M = a_H^3$	$M_{\text{мод.}} = M_{\text{нат.}} / a_H^3$	$M_{\text{мод.}} = M_{\text{нат.}} / a_H^3$
F (сила), т (с)	$a_F = a_H^3$	$F_{\text{мод.}} = F_{\text{нат.}} / a_H^3$	$F_{\text{мод.}} = F_{\text{нат.}} / a_H^3$
$E_{\text{прон.}}$ (проницаемость)	$A_{\text{прон.}} = 1$	$E_{\text{прон.мод.}} = E_{\text{прон.нат.}}$	$E_{\text{прон.мод.}} = E_{\text{прон.нат.}}$
P (давление), т/м ²	$a_P = a_H$	$P_{\text{мод.}} = P_{\text{нат.}} / a_H$	$P_{\text{мод.}} = P_{\text{нат.}} / a_H$

Где $H = 3,0 \cdot S^*$ – наиболее эффективный размер «Модифицированного гексаблока» и «Модифицированного тетраблока» с высоким волногасящим действием, устойчивости их на откосе и простоты технологии изготовления.

Берегоукрепление из каменной наброски

Одним из надежных и удобных средств укрепления берега горных водохранилищ является устройство каменной наброски [Варазашвили Н.Г., Иорданишвили И.К., 1985]. Расчет диаметра камня в наброске осуществляется по детерминированным формулам, в которых учитываются следующие факторы и параметры: скорость течения (V), уклон берега ($m = ctg\alpha$), высота (h) и длина волны (λ), плотность камня и воды (ρ_K, ρ_B).

Оценка устойчивости каменной наброски от воздействия волн оценивается соотношением сил внешнего воздействия (\bar{t}) и сил реакции (\bar{R}), которое имеет следующий вид:

$$\frac{\bar{t}}{n} \leq \bar{R}, \quad (\text{VIII.3.3})$$

где n – коэффициент условий работы.

Исходя из специфики горных водохранилищ, формула (VIII.3.3) включает следующие дополнительные условия:

1. Камни имеют форму шара и на них действуют два вида волн-вскат на берег (вб) и ската с берега (сб);

2. Устойчивость камня рассчитывается для двух положений, когда камень выступает соответственно на 0,93 и 0,74 части диаметра (рис. VIII.3.7, а, б);

3. Максимальные скорости волн на уровне спокойной зоны рассчитаны по рекомендациям [Варазашвили Н.Г., Иорданишвили И.К., 1983];

4. Коэффициент шероховатости касательного трения $f_x = 0.12$ [Harti I., 1978].

С учетом вышеперечисленных факторов уравнение устойчивости камня на откосе записывается следующим образом:

$$\text{а) } 0.076 \frac{1}{n} \rho_B V_{\text{вск}}^2 \cdot (0,44m - 0,03) \leq D(\rho_K - \rho_B)(m + 1,7) \quad (\text{VIII.3.4})$$

$$\text{б) } 0.076 \frac{1}{n} \rho_B V_{\text{вск}}^2 \cdot (0,38m - 0,26) \leq D(\rho_K - \rho_B)(m + 1,7) \quad (\text{VIII.3.5})$$

Это неравенство можно использовать для расчета предельных значений диаметра камня:

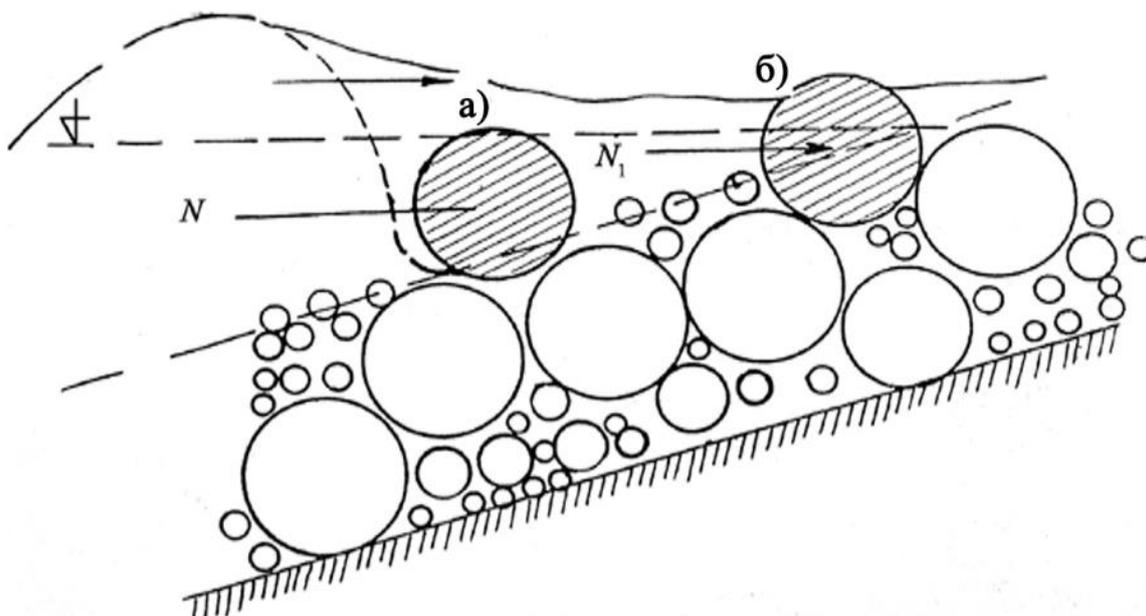
$$\text{для схемы - а) } D = 0,076 \frac{1}{n} V_{\text{вск}}^2 \cdot \frac{\rho_B}{\rho_K - \rho_B} \cdot \frac{0,44m - 0,03}{m + 1,7}, \quad (\text{VIII.3.6})$$

$$\text{для схемы - б) } D = 0,076 \frac{1}{n} V_{\text{вск}}^2 \cdot \frac{\rho_B}{\rho_K - \rho_B} \cdot \frac{0,38m - 0,26}{m + 1,7}, \quad (\text{VIII.3.7})$$

где $V_{\text{вск}}$ – скорость вската волны на берег, рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{вск}} = 1,34[1,1 + 1,25h + 1,25h^2] \cdot \left[0,9 + 8,78 \frac{1}{m} - 15,69 \left(\frac{1}{m}\right)^2\right] \cdot \left[0,65 + 0,28 \frac{\lambda}{h} - 0,01 \left(\frac{\lambda}{h}\right)^2\right] \quad (\text{VIII.3.8})$$

а)



б)

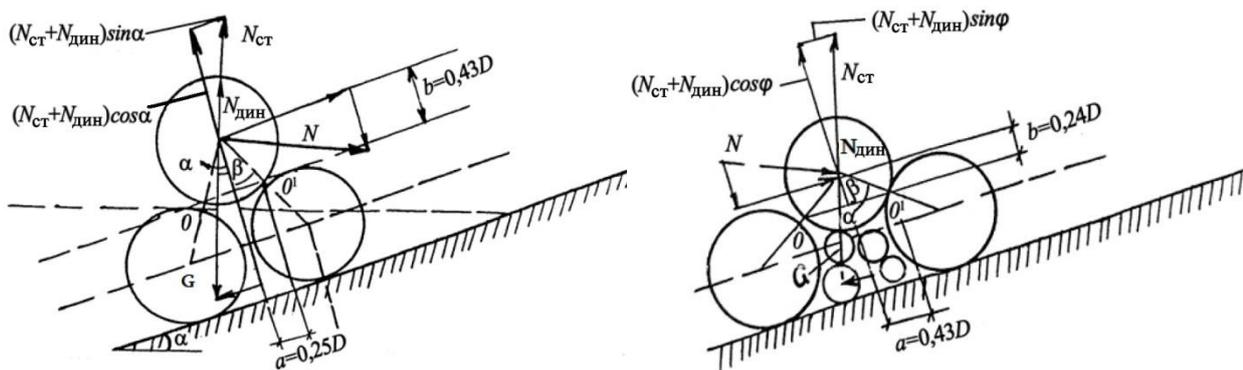


Рис. VIII.3.7. Схема устойчивости каменной наброски при накате волны на берег.

Камень выступает: а) $b=0.93D$; б) $b=0.74D$, где N , $N_{дин}$, $N_{ст}$, G – гидродинамическая, гидростатическая и гравитационная силы

В случае ската волны с откоса - диаметр камня определяется по зависимости:

$$D = 0.05 \frac{1}{n} V_{ск}^2 \cdot \frac{\rho_B}{\rho_K - \rho_B} \cdot \frac{m+2}{2m-1}, \quad (VIII.3.9)$$

где $V_{ск} = \frac{V_{вск}}{3}$.

Предельные значения диаметра камня, рассчитанные указанным выше методом, совпадают с результатами лабораторных и натурных исследований.

VIII.4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ БЕРЕГОВОЙ ПОЛОСЫ (Б.П.) И ВОДООХРАННОЙ ЗОНЫ (В.З.) ГОРНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

VIII.4.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ БЕРЕГОВОЙ ПОЛОСЫ (Б.П.) И ВОДООХРАННОЙ ЗОНЫ (В.З.) ВОДОХРАНИЛИЩ

Внутренней границей водоохранной **береговой полосы** (Б.П.) является отметка подтопления водохранилища, а внешняя граница определяется с учетом 50-летней переработки берега:

$$L_{б.п.} \geq 50,0 \text{ м.} \quad (VIII.4.1)$$

Ширина **водоохранной зоны** (В.З.) определяется с учетом объема биогенной нагрузки и ее поглощения природными фильтрами.

Ширина водоохранной зоны (В.З.) назначается от форсированного уровня водохранилища при полном удерживании биогенной нагрузки, рассчитывается по формуле [И. Иорданишвили, К. Иорданишвили, 2010 (на грузинском языке)]:

$$L_{в.зон.} = L_{б.п.} + L_0 \cdot \lambda_{\rho\%} \cdot K_{лес} \cdot K_{гр.} \cdot K_{э} \cdot K_{шер.}, \quad (VIII.4.2)$$

где $L_{б.п.} = 50,0$ м – ширина береговой полосы водохранилища; L_0 – эталонная ширина водоохранной зоны горных водоемов, величина которой $L_0 = 300,0$ м при уклоне берега до 5° , $L_0 = 280,0$ м при уклоне берега от 5° до 12° ; $L_0 = 260,0$ м при уклоне берега до $12^\circ \div 18^\circ$;

$L_0 = 240,0$ м при уклоне берега до $18^\circ \div 25^\circ$; $L_0 = 220,0$ м при уклоне берега $>25^\circ$, (для водохранилищ равнинного типа, уклон берега которых менее $5^\circ - L_0 > 500$ м); $\lambda_{р\%}$ – расчетный коэффициент среднегодового стока ($\lambda_{р\%} = 0,5 \div 2,0$); $K_{лес} = 0,85 \div 1,0$ – коэффициент лиственного и других типов леса (табл. VIII.4.1).

Таблица VIII.4.1

Значения $K_{лес}$

Тип леса	Лиственный	Смешанный	Хвойный
$K_{лес}$	1,0	0,92	0,85

$K_{гр.} = 1,0 \div 2,0$ – коэффициент, зависящий от типа грунта склона (табл. VIII.4.2);

Таблица VIII.4.2

Значения $K_{гр.}$

Почва	Суглинистая почва	Средняя почва	Тяжелая почва
$K_{гр.}$	1,0	1,5	2,0

K_α – коэффициент, зависящий от экспозиции склона (табл. VIII.4.3):

Таблица VIII.4.3

Значения K_α

Экспозиция склона	Северо-восток и запад	Юго-восток и северо-запад	Юг и Юго-запад
K_α	1,0	0,8	1,2

$K_{шер.}$ – коэффициент шероховатости, значение которого зависит от того, как распашан берег – поперечно, продольно или использовано для пастбищ (табл. VIII.4.4):

Таблица VIII.4.4

Значения $K_{шер.}$

$K_{шер.}$	При распашке берега в поперечном направлении или при использовании пастбищ	При распашке вдоль берега
	1,6	2,6

VIII.4.2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОСФОРНОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Количество фосфора, стекающего со склонов в водохранилище, зависит от ширины водооохранной зоны. Источниками фосфора являются: минеральные и органические удобрения, навоз и бытовые стоки населенных пунктов. Нормативы фосфора (W_ϕ), спускаемые со склонов в водохранилище, приведены в таблице VIII.4.5 [Гигиенические..., 2001; Методические рекомендации..., 1988]:

Таблица VIII.4.5

Возможное количество вносимого фосфора в водохранилище

Источник нагрузки	Вынос фосфора, $W_{\text{ф}}$, (кг/год)
1	2
Население (с 1-го человека)	0,2773
Пашня (с 1 га)	1,0
Орошаемые земли (с 1 га)	0,5
Скот (с одной единицы)	3,64
Птица (с одной единицы)	0,0092
Свиньи (с одной единицы)	45,0
Овцы (с одной единицы)	20

С использованием карт (М:5000÷10000) с площади водосбора (F) водохранилища возможное количество отдельных видов фосфора, вынесенных с этих территорий, рассчитаны по формуле:

$$\sum W_{\text{ф.возм.}} = F \cdot W_{\text{ф.удельн.}}, \quad (\text{VIII.4.3})$$

где $W_{\text{ф.возм.}}$ – количество возможного удельного выноса фосфора, F – площадь водохранилища; фактическое суммарное количество выноса фосфора ($\sum W_{\text{ф.факт.}}$) определяется по формуле:

$$\sum W_{\text{ф.факт.}} = \sum W_{\text{ф.возм.}} - \sum W_{\text{ф.полгл.}}, \quad (\text{VIII.4.4})$$

где $\sum W_{\text{ф.полгл.}}$ – общее количество фосфора, поглощенного природными фильтрами (лесом, лугом, болотом). Его количество определяется нормативными показателями фильтра (табл. VIII.4.6):

Таблица VIII.4.6

Норма показателей поглощения фосфора природными фильтрами ($W_{\text{ф.погл.}}$)

Тип естественного фильтра	Норма поглощения фосфора природным фильтром, т/га в год
Лес	0,031
Луг	0,004
Болото	0,18

Остаточное количество фосфора ($\sum W_{\text{ф.ост.}}$) определяется разницей между фактической нагрузкой от фосфора ($\sum W_{\text{ф.факт.}}$) и количеством поглощенного фильтрами фосфора ($\sum W_{\text{ф.погл.}}$):

$$\sum W_{\text{ф.ост.}} = \sum W_{\text{ф.факт.}} - \sum W_{\text{ф.погл.}}, \text{ т/год} \quad (\text{VIII.4.5})$$

С помощью показателя $\sum W_{\text{ф.ост.}}$ можно определить эффективность водоохранного мероприятия в баллах с учетом уклона берега (табл. VIII.4.7):

Эффективность водоохранных мероприятий (в баллах)

Источники фосфора	Остаточная нагрузка	Уклон берега, в градусах	Балл
	Фосфор т/год		
Селитебные территории	< 2	< 5	2
		> 5	3-4
		> 10	5-6
Селитебные территории	> 2	< 5	3
		> 5	4-5
		> 10	7
Пахотные земли	< 15	< 5	3
		> 5	4
		> 10	8
	> 15	< 5	4
		> 5	7
		> 10	8
Орошаемые земли	< 0,5	< 5	1
		> 5	1
		> 10	3-4
	> 0,5	< 5	2
		> 5	3
		> 10	4-6
Фермы	< 30	< 5	4
		> 5	6
		> 10	8

Если бальность фосфорной нагрузки больше нормативной, необходимо принять меры по уменьшению поверхностного стока фосфора – назначить водоохранную зону, а при бальности нагрузки более 5 – необходимо осуществление хозяйственных мероприятий.

Основным принципом хозяйственных мероприятий на территории водоохранной зоны водохранилища является рациональное использование водных и земельных ресурсов с учетом режима работы водохранилища.

В соответствии с природными условиями водохранилищ выделены **две зоны хозяйственных мероприятий**: первая – зона строгого режима и вторая – зона ограниченной хозяйственной деятельности.

В пределах водоохранной зоны (В.З.) запрещается: размещение животноводческих комплексов, складов химикатов, удобрений; свалка различных отходов; вырубка леса; вспашка земель по склону; сброс неочищенных поверхностных вод в водохранилище; устройство парковок.

VIII.4.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ШИРИНЫ БЕРЕГОВОЙ ПОЛОСЫ (Б.П.) И ВОДООХРАННОЙ ЗОНЫ (В.З.) СИОНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Параметры береговой полосы (Б.П.) и водоохранной зоны (В.З.) для Сионского водохранилища определяются с учетом вида использования прибрежной территории – пашни, сенокосы и селитебные участки, лесные массивы и животноводческие фермы (табл. VIII.4.8).

Таблица VIII.4.8

Основные характеристики расчетных участков Сионского водохранилища

Нумерация участков (рис. VIII.4.1)	Использование	Расположение	Длина на отметке $\nabla 1068,0$ м	Расчетные поперечники	Уклон берега (градусы)
Первый	Селитебная территория (с. Сиони)	левый	1750	I	4°
		правый	1500	II	18°
Второй	Пахотный	левый	5 000	(II,III,IV)	7°-8°
Третий	Сенокос	левый	5 000	(V,VII,VIII)	15°-25°
Четвертый	Лесные массивы	левый	2 500	(IX)	15°
		левый	2 500	(X)	15°
		правый	3 000	(IX)	18°
		правый	3 000	(X)	6°
		правый	5 000	(III,IV)	11°
Пятый	Птица	правый	5 00	(V)	7°
Шестой	Селитебная территория	правый	6 500	(VI)	20°
Седьмой	Свинарники	правый	5 00	(VIII)	10°

Внутренняя граница береговой полосы (Б.П.) водохранилища назначено от нормального уровня затопления водохранилища, а **внешняя граница** – от форсированного уровня затопления на расстоянии 50 летней переработки берега от уровня.

Ширина береговой полосы Сионского водохранилища (Б.П.) определяется от зоны затопления уровня водохранилища, т.е. от $\nabla 1070,0$ м. Результаты расчета представлены в таблице VIII.4.9 (рис. VIII.4.1; VIII.4.2).

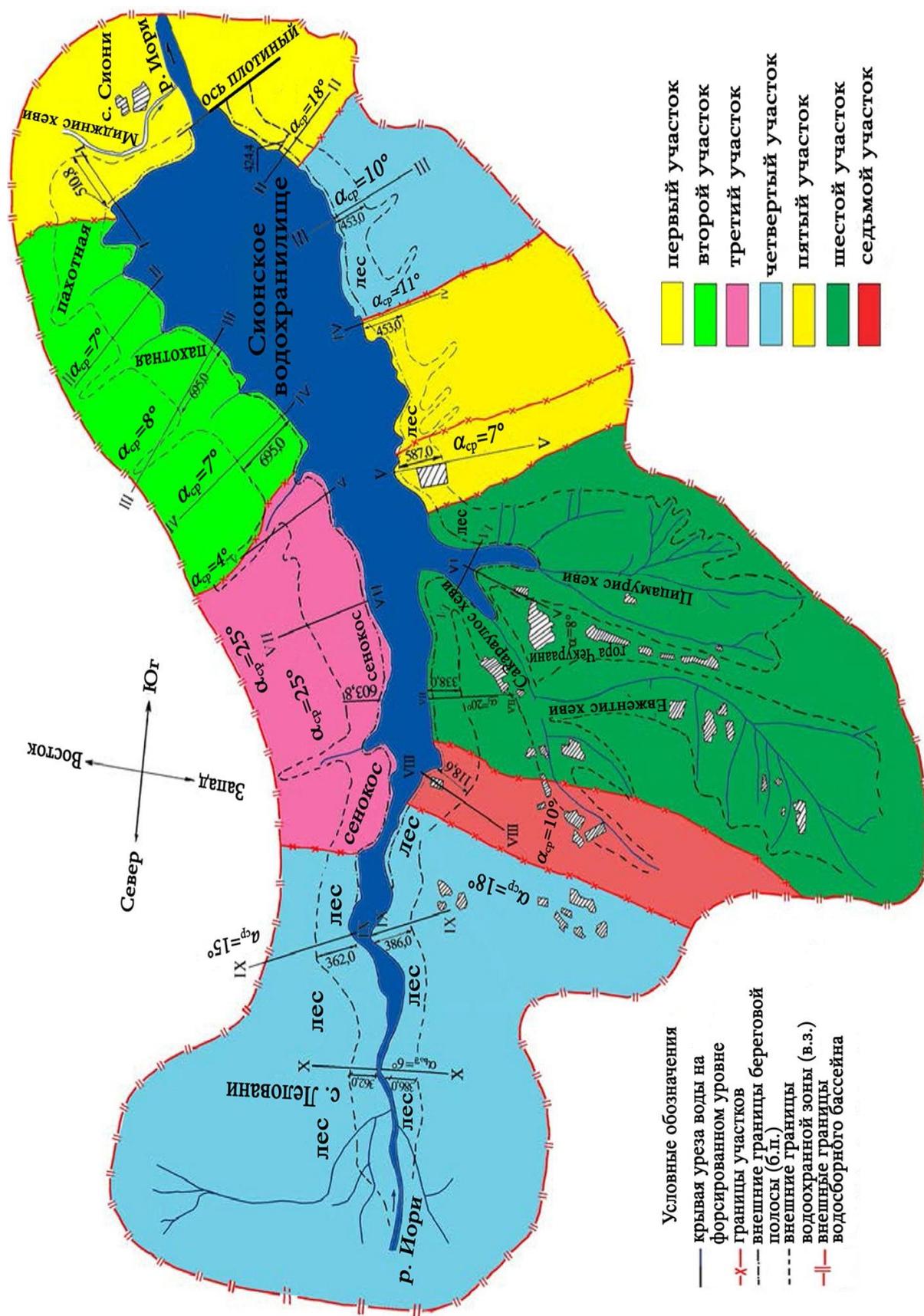


Рис. VIII.4.1. Границы водоохранной зоны (В.З.) и береговой линии (Б.Л.) Сионского водохранилища

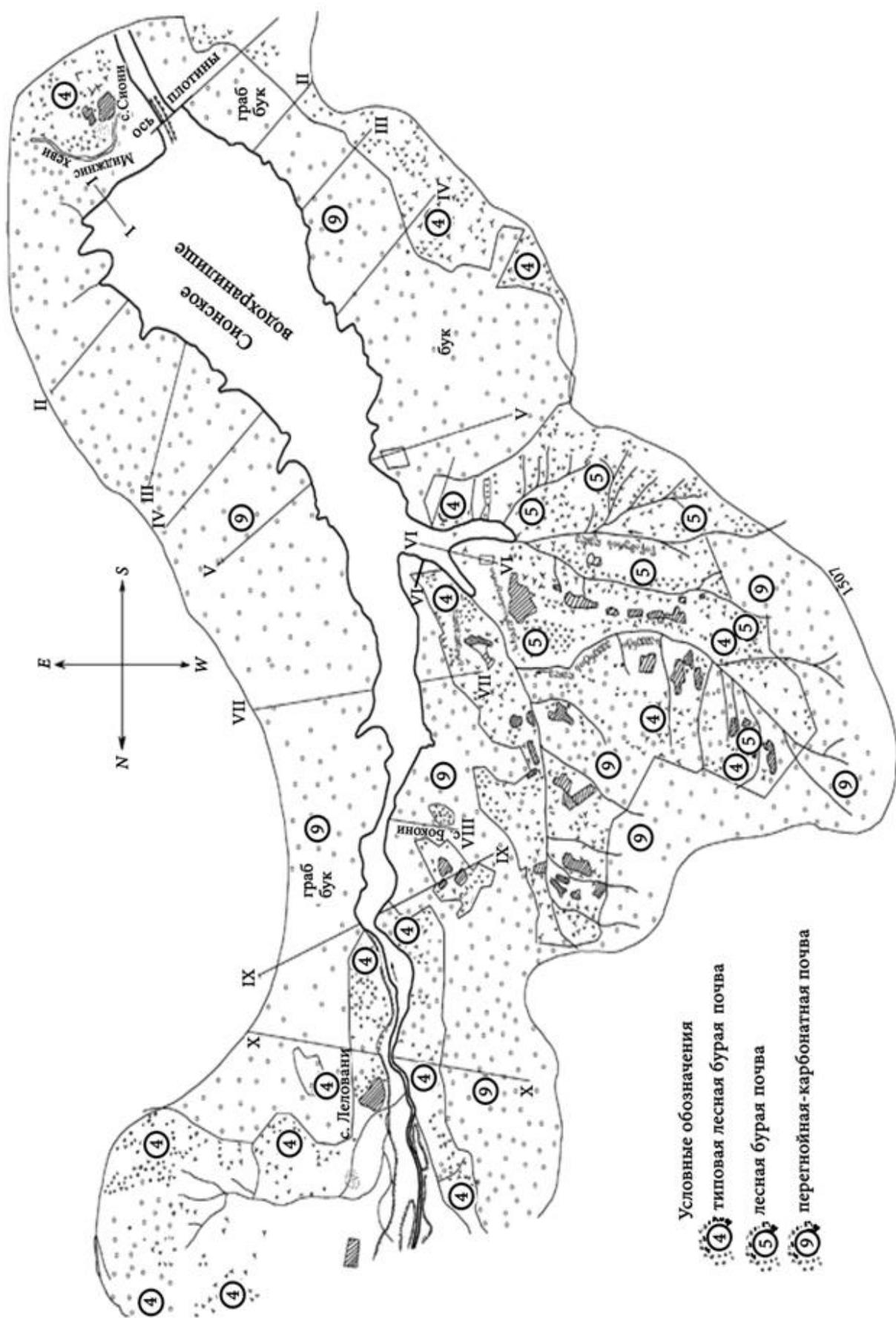


Рис. VIII.4.2. Типы грунтов бассейна Сионского водохранилища

Таблица VIII.4.9

Азотно-фосфорная нагрузка на Сионское водохранилище

Наименование объектов	Количественный показатель	Выносимая норма, кг/год (на единицу)		Общая нагрузка, кг/год	
		Азот	Фосфор	Азот	Фосфор
1	2	3	4	5	6
Селитебная территория	156 га	6,0	3,0	936,0	468,0
Бытовой сток		0,355	0,277		
Население	2325 человек	0,265	0,207	616,13	481,27
Курортный сезон	3150 человек	0,09	0,07	283,6	220,5
Пахотные земли	239 га	3,0	1,0	717,0	239,0
Скот	160 шт.	0,26	3,64	41,6	582,0
Свиноферма	400 шт.	–	45,0		18000,0
Птица	50000 шт.	0,092	0,0092	460,0	46,0
Общее число в год				3054,2	20036,77

Расчеты количества биогенных элементов, поглощенных природными фильтрами (П.Ф.), представлены в таблице VIII.4.10.

Таблица VIII.4.10

Количество биогенных элементов, поглощенных природными фильтрами (П.Ф.) на Сионском водохранилище

Источник биогенных нагрузок		Площадь естественного фильтра, га		Объем поглощения в т/га/год		Суммарное поглощение, (П.Ф.), т/год
		лес, га	луг, га	лес, т/год	луг, т/год	
Птицы		0,80	0,75	0,0248	0,003	0,0278
Свиньи		0,15	0,225	0,0047	0,0009	0,0056
Скот		1,0	2,50	0,031	0,01	0,041
Селитебные территории	с. Сиони	2,0	9,50	0,062	0,38	0,442
	с. Чакуриант Гори	10,9	14,5	0,319	0,058	0,377
Пахотные земли		–	17,5	–	0,07	0,07
Всего				0,4415	0,5219	0,9634

Результаты расчетов остаточной биогенной нагрузки отходами (БН = БО – Пф) представлены в таблице VIII.4.11; где БН – остаточная биогенная нагрузка; БО – биогенная общая нагрузка; Пф – количество биогенных элементов, поглощенных природным фильтром. Расчетная ширина водоохранной зоны (В.З.) приведена в таблице VIII.4.12 и на рисунке VIII.4.2.

Таблица VIII.4.11

Расчет нагрузки биогенными отходами на Сионское водохранилище

Источники загрязнения	Общая биогенная нагрузка БО, т/га в год		Поглощающим фильтром ПФ, т/га в год	Остаточная биогенная нагрузка БН, т/ в год		Уклон берега	Оценка мероприятий (в баллах)	
	От фосфора	Всего		Фосфор	Общий		От фосфора	От общей биогенной нагрузки
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Птицы	0,046	0,506	0,028	0,018	0,488	7°	7	8
Свиньи	18,00	18,0	0,006	17,99	17,99	6°	6	8
Скот	0,582	0,623	0,041	0,541	0,582	8°	5	5
Селитебные территории								
с. Сиони	0,439	1,001	0,442	Поглощение	0,559	5°	–	2
С. Чакуриант Гори	0,263	0,600	0,377	„-“	0,223	5°	–	3
Пахотные земли	0,239	0,954	0,07	0,169	0,886	7°	4	7
Всего	19,75	22,73	0,954	18,88	20,728	7°	–	–

Таблица VIII.4.12

Результаты расчета ширины водоохранной зоны (В.З.)
Сионского водохранилища

№	№ участка	№ сечения	Эталонная ширина береговой зоны L _{0.м}	Средний уклон (градусы)	Экспозиция	Коэффициенты				Ширина водоохранной зоны, м L _{в.з.}
						K _{лес} (табл. VIII.4.1)	K _{гр.} (табл. VIII.4.2)	K _{в.} (табл. VIII.4.3)	K _{мер.} (табл. VIII.1.6÷VIII.2.6)	От фактического состояния рельефа местности (L _{в.з.}) (факт. формула III.4.1)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	первый (слева)	I	300	4°	сев.	-	1,2	0,8	1,6	510,8
2	первый (справа)	II	260	18°	сев. вост.	1,0	1,2	1,2	1,0	424,4
3	второй (слева)	II	980	7°	сев. зап.	-	1,2	1,2	1,6	695,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	второй (слева)	III	280	8°	сев. зап.	-	1,2	1,2	1,6	695,1
5	второй (слева)	IV	980	7°	сев. зап.	-	1,2	1,2	1,6	695,1
6	третий (слева)	V	300	4°	сев. зап.	-	1,2	1,2	1,6	689
7	третий (слева)	VII	260	18°	сев. зап.	-	1,2	2,13 1,2	1,6	603,8
8	четвертый (слева)	IX	260	15°	зап.	1,0	1,2	1,0	1,0	362,0
9	четвертый (слева)	X	260	15°	зап.	1,0	1,2	1,0	1,0	362,0
10	четвертый (справа)	IX	260	18°	сев. вост.	1,0	1,2	1,2	1,0	362,0
11	четвертый (справа)	X	280	6°	вост.	1,0	1,2	1,0	1,0	386,0
12	четвертый (справа)	III	280	10°	сев. вост.	1,0	1,2	1,2	1,0	453,0
13	четвертый (справа)	IV	280	11°	сев. вост.	1,0	1,2	1,2	1,0	453,0
14	пятый (справа)	V	280	7°	вост.	1,0	1,2	1,0	1,6	587
15	шестой (справа)	VI	280	8°	ЮГО вост.	1,0	1,2	0,8	1,6	480,1
16	шестой (справа)	VII	240	20°	вост.	1,0	1,2	1,0	1,0	338,0
17	седьмой (справа)	VIII	240	10°	ЮГО вост.	1,0	1,2	0,8	1,6	418,6
БН – остаточная биогенная нагрузка; БО – общая биогенная нагрузка; ПФ – поглощаемая фильтрами.										

Прибрежная полоса, примыкающая к водохранилищу, шириной 50,0 м, является полосой **строгого режима**. В водоохранной зоне запрещается: строительство новых объектов; обработка почв ядохимикатами с использованием хлорорганических веществ; устройство кладбищ; организация скотоводческих ферм, свиноферм и птицеферм.

IX. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ОТКРЫТЫХ ВОДОТОКАХ

IX.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОТКРЫТЫХ ВОДОТОКАХ

Для моделирования гидравлических процессов на открытых водотоках используются методы математического и физического моделирования [Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Нетюхайло А.П., Шеренков И.А., Даденков В.Ю., Клешевникова Т.П., Железняк И.А., 1984].

Математическая модель гидравлического явления или процесса создается на основе применения общих законов механики - сохранения движения, массы и энергии. Используя методы классической механики, можно получить информацию о процессах или событиях в виде дифференциальных уравнений. В этом случае роль лабораторного оборудования выполняет компьютерная техника по заданной программе.

Физическое моделирование применяют при исследовании гидродинамических процессов в лабораторных условиях, где необходимо выполнение механических законов подобия – геометрического, кинематического, динамического подобия при равных начальных условиях. В этом случае исследование гидравлических процессов проводится на уменьшенной модели.

Процессы – **механически подобны**, если соотношение их **геометрических** элементов – длины, расстояния, плотности и сил – одинаково.

Полное **гидродинамическое подобие** требует геометрического, кинематического и динамического подобия течений.

Потоки **геометрически подобны**, если существует постоянная связь между их соответствующими значениями ширины, площади и объема: $L_{\text{нат.}}/L_{\text{мод.}} = \alpha_L$, $\omega_{\text{нат.}}/\omega_{\text{мод.}} = \alpha_L^2$, $W_{\text{нат.}}/W_{\text{мод.}} = \alpha_L^3$, где α_L – линейный масштаб, показывающий, во сколько раз линейное модельное значение ($L_{\text{мод.}}$) меньше линейного натурального значения ($L_{\text{нат.}}$).

Два течения **кинематически подобны**, если модельная ($V_{\text{мод.}}$) и натурная скорости ($V_{\text{нат.}}$) течений в подобных точках жидкости связаны масштабom (α_V):

$$\alpha_V = V_{\text{нат.}}/V_{\text{мод.}} \quad (\text{IX.1.1})$$

Два течения **динамически подобны**, если модельная ($F_{\text{мод.}}$) и натурная ($F_{\text{нат.}}$) силы, действующие на поток, и плотности ($\rho_{\text{мод.}}$) и ($\rho_{\text{нат.}}$) в сходных точках связаны масштабom (α_F) и (α_ρ):

$$F_{\text{мод.}}/F_{\text{нат.}} = \alpha_F, \quad \rho_{\text{мод.}} / \rho_{\text{нат.}} = \alpha_\rho, \quad (\text{IX.1.2})$$

где α_F — масштаб силы, α_ρ — масштаб плотности.

Соотношения между масштабomи α_L , α_V , α_ρ и α_F следующие:

$$\alpha_F = \alpha_\rho \cdot \alpha_L^2 \cdot \alpha_V^2. \quad (\text{IX.1.3})$$

Эта зависимость масштабных множителей известна по т.н. закону подобия Ньютона.

Взаимосвязь масштабных множителей можно записать в следующем виде:

$$\frac{F_{\text{нат.}}}{\rho_{\text{нат.}} \cdot L_{\text{нат.}}^2 V_{\text{нат.}}^2} = \frac{F_{\text{мод.}}}{\rho_{\text{мод.}} \cdot L_{\text{мод.}}^2 V_{\text{мод.}}^2}, \quad (\text{IX.1.4})$$

откуда:

$$N_{\ell_{\text{нат.}}} = N_{\ell_{\text{мод.}}} \text{ или } N_{\ell} = \textit{idem}, \quad (\text{IX.1.5})$$

где $N_l = \frac{F}{\rho L^2 V^2}$ – безразмерный критерий Ньютона.

Т.о., если параметры течений удовлетворяют требованиям геометрического, кинематического и динамического подобия, то эти течения гидродинамически (гидравлически) подобны, что обеспечивается равенством модельных и натуральных критериев Ньютона.

IX.2. БЕЗРАЗМЕРНЫЕ КРИТЕРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Условием гидродинамического подобия является равенство модельных и натуральных сил – гравитации, давления, инерции, трения, поверхностного натяжения и других соотношений. Поскольку в силу физических особенностей этих сил полное подобие всех сил на модели и в природе практически невозможно, поэтому необходимо учитывать действующую (основную) силу. Если безразмерный критерий Фруда учитывает превосходство силы тяжести, то с учетом (IX.1.3) должно выполняться следующее условие:

$$\frac{\alpha_V^2}{\alpha_g \cdot \alpha} = 1, \quad (\text{IX.2.1})$$

или
$$\frac{V_{\text{нат.}}^2}{gL_{\text{нат.}}} = \frac{V_{\text{мод.}}^2}{gL_{\text{мод.}}} = Fr, \quad (\text{IX.2.2})$$

где Fr – число Фруда.

Геометрически подобные течения (с преобладанием силы тяжести) **гидродинамически** подобны, если **критерии Фруда** для модельных и натуральных течений идентичны:

$$Fr_{\text{нат.}} = Fr_{\text{мод.}} = \textit{idem}, \quad (\text{IX.2.3})$$

тогда расчетные соотношения моделируемой и натурной скоростей потока (V), расхода (Q), времени (t) и гидравлического уклона (i) записываются :

$$V_{\text{нат.}} = V_{\text{мод.}} \cdot \sqrt{\alpha} \quad (\text{IX.2.4})$$

$$Q_{\text{нат.}} = Q_{\text{мод.}} \cdot \alpha^{2.5} \quad (\text{IX.2.5})$$

$$t_{\text{нат.}} = t_{\text{мод.}} \cdot \sqrt{\alpha} \quad (\text{IX.2.6})$$

$$i_{\text{нат.}} = i_{\text{мод.}} \quad (\text{IX.2.7})$$

Зависимость (IX.2.7) соответствует турбулентному режиму движения в квадратичной области сопротивления.

Безразмерный критерий Рейнольдса учитывает превосходство сил шероховатости, тогда соотношение (IX.1.3) записывается:

$$\frac{V_{\text{нат.}} \cdot L_{\text{нат.}}}{\nu_{\text{нат.}}} = \frac{V_{\text{мод.}} \cdot L_{\text{мод.}}}{\nu_{\text{мод.}}} = Re, \quad (\text{IX.2.8})$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Течения, в которых преобладают силы шереховатости, гидродинамически подобны, если модельные и натурные критерии Рейнольдса идентичны:

$$Re_{\text{нат.}} = Re_{\text{мод.}} = idem, \quad (IX.2.9)$$

тогда расчетные соотношения моделируемой и натурной скоростей потока (V), расхода (Q), времени (t) и гидравлического уклона (i) записываются:

$$V_{\text{нат.}} = \frac{V_{\text{мод.}}}{\alpha}, \quad (IX.2.10)$$

$$Q_{\text{нат.}} = Q_{\text{мод.}} \cdot \alpha, \quad (IX.2.11)$$

$$t_{\text{нат.}} = t_{\text{мод.}} \cdot \alpha^2, \quad (IX.2.12)$$

$$i_{\text{нат.}} = \frac{i_{\text{мод.}}}{\alpha^3}. \quad (IX.2.13)$$

Безразмерный критерий Эйлера предполагает преобладание сил давления, тогда условие (IX.1.3) записывается:

$$\frac{P_{\text{нат.}}}{\rho_{\text{нат.}} V_{\text{нат.}}^2} = \frac{P_{\text{мод.}}}{\rho_{\text{мод.}} V_{\text{мод.}}^2} = Eu, \quad (IX.2.14)$$

где P – суммарная сила гидростатического давления в точке течения, кг/м²; ρ – плотность жидкости, кг/м³. Тогда течения, в которых преобладает гидростатическое давление, гидродинамически подобны, если модельный и натуральный критерии Эйлера идентичны:

$$Eu_{\text{нат.}} = Eu_{\text{мод.}} = idem. \quad (IX.2.15)$$

При выполнении критерия Рейнольдса автоматически выполняется критерий Эйлера, тогда:

$$Eu = \lambda \frac{1}{2a}, \quad (IX.2.16)$$

где λ – коэффициент гидравлической шереховатости, d – диаметр трубы.

Безразмерный критерий Вебера предполагает преобладание поверхностных (капиллярных) сил, тогда условие (IX.1.3) записывается:

$$\frac{\rho_{\text{нат.}} \cdot V_{\text{нат.}}^2 \cdot L_{\text{нат.}}}{n_{\text{нат.}}} = \frac{\rho_{\text{мод.}} \cdot V_{\text{мод.}}^2 \cdot L_{\text{мод.}}}{n_{\text{мод.}}} = We, \quad (IX.2.17)$$

где (n) – коэффициент поверхностного натяжения, We – критерий Вебера, модельное и натурное значения которых равны:

$$We_{\text{нат.}} = We_{\text{мод.}} = idem. \quad (IX.2.18)$$

Безразмерный критерий Струхалья учитывает превосходство сил инерции, тогда зависимость (IX.1.3) при установившемся движении жидкости записывается:

$$\frac{V_{\text{нат.}} \cdot t_{\text{нат.}}}{L_{\text{нат.}}} = \frac{V_{\text{мод.}} \cdot t_{\text{мод.}}}{L_{\text{мод.}}} = St, \quad (IX.2.19)$$

где St – критерий Струхалья, модельное и натурное значения которого равны:

$$St_{\text{нат.}} = St_{\text{мод.}} = idem, \quad (IX.2.20)$$

а соотношение времени записывается в виде:

$$t_{\text{нат.}} = t_{\text{мод.}} \quad (IX.2.21)$$

Безразмерный **критерий Маха** учитывает преимущество сжимаемости жидкости (при обтекании тел высокоскоростным потоком сжатой жидкости), тогда соотношение (IX.1.3) записывается:

$$V_{\text{нат.}}/C_{\text{нат.}} = V_{\text{мод.}}/C_{\text{мод.}} = M, \quad (\text{IX.2.22})$$

где C - скорость распространения звука в жидкости, а M - критерий Маха, модельное и натуральное значения которого равны:

$$M_{\text{нат.}} = M_{\text{мод.}} = \text{idem}, \quad (\text{IX.2.23})$$

Безразмерный **критерий Архимеда** учитывает превосходство архимедовых сил, которые образуются за счет разности плотностей двух разных сред $(\rho-\rho_1)$, например, при холодном и теплом воздухе, тогда соотношение (IX.1.3) записывается:

$$\frac{g_{\text{нат.}} \cdot L_{\text{нат.}}}{V_{\text{нат.}}^2} \cdot \frac{(\rho-\rho_1)_{\text{нат.}}}{\rho_{\text{нат.1}}} = \frac{g_{\text{мод.}} \cdot L_{\text{мод.}}}{V_{\text{мод.}}^2} \cdot \frac{(\rho-\rho_1)_{\text{мод.}}}{\rho_{\text{мод.1}}} = Ar, \quad (\text{IX.2.24})$$

где Ar – **критерий Архимеда**, модельное и натурное значения которых равны:

$$Ar_{\text{нат.}} = Ar_{\text{мод.}} = \text{idem}. \quad (\text{IX.2.25})$$

Безразмерный **критерий Коши** учитывает преобладание сил упругости (например, гидравлический удар в трубах), тогда соотношение (IX.1.3) записывается:

$$\frac{V_{\text{нат.}}^2 \cdot \rho_{\text{нат.}}}{E_{\text{нат.}}} = \frac{V_{\text{мод.}}^2 \cdot \rho_{\text{мод.}}}{E_{\text{мод.}}} = Co, \quad (\text{IX.2.26})$$

где E – модуль упругости материала; Co – критерий Коши, модельное и натурное значения которого равны:

$$Co_{\text{нат.}} = Co_{\text{мод.}} = \text{idem}. \quad (\text{IX.2.27})$$

Безразмерный **критерий Лагранжа** учитывает подобие турбулентных вязких течений, его можно записать в виде произведения критериев Эйлера и Рейнольдса:

$$L = Eu \cdot Re = \text{idem}. \quad (\text{IX.2.28})$$

Другие критерии – **числа Прандтля и Ричардсона** используются для редких частных случаев:

$$Pr = \frac{\nu}{\lambda_1} - \text{число Прандтля}, \quad (\text{IX.2.29})$$

$$Rf = \frac{\sqrt{EL}}{\lambda_2} - \text{число Ричардсона}, \quad (\text{IX.2.30})$$

где ν – турбулентная вязкость потока жидкости, $\lambda_1 = \frac{\bar{u}_1 - \bar{u}_2}{u_1 + u_2}$, где \bar{u}_1 и \bar{u}_2 – осредненные составляющие продольной скорости, λ_2 – коэффициент теплопроводности; E – турбулентная кинетическая энергия; L – коэффициент Монина-Обухова.

Значения основных масштабных коэффициентов моделирования приведены в таблице IX.2.1.

Основные масштабные коэффициенты для моделирования

Критерий	Масштабный коэффициент							
	Длины	Площади	Объема	Времени	Скорости	Ускорения	Расхода	Силы
Fr	a	a^2	a^3	$a^{0.5}$	$a^{0.5}$	1	$a^{2.5}$	a^3
Re	a		a^3	a^2	a^1	a^{-3}	a	1
Ar	a	a^2	a^3	$a^{3.5}$	$a^{2.5}$	a^{-6}	$a^{0.5}$	a^3
We	a	a^2	a^3	$a^{1.5}$	$a^{0.5}$	a^{-2}	$a^{1.5}$	a
Co	a	a^2	a^3	a	1	a^{-1}	a^2	a^2

Основные законы моделирования потоков можно сформулировать следующим образом:

- если натурный поток находится в турбулентном состоянии, то модельный поток также должен быть турбулентным;
- если натурный поток в спокойном состоянии, то и модельный поток должен быть в спокойном состоянии;
- при моделировании потоков предпочтительно сохранять геометрическое подобие коэффициента шероховатости;
- движение наносов в натуре и в модели должны быть подобны;
- при кавитации место разрыва натурального течения должно находиться в соответствующем месте модельного течения;
- влияние поверхностного натяжения должно быть настолько малым, чтобы оно не мешало образованию волн.

IX.3. Моделирование волновых процессов

Схема моделирования волнового процесса рассматривается для двух случаев: до зоны обрушения волны и в зоне обрушения [Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., 2011; Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б., 2018].

Пересчет модельных гидродинамических характеристик волн в натуру до зоны обрушения волн

Анализ результатов экспериментов, проведенных на стендах разного масштаба, показал нам, что критерием моделирования вплоть до зоны обрушения волн является гравитационный закон Фруда (Fr), где процессы протекают в автомодельной зоне. Тогда, используя линейные масштабы моделирования ($\alpha_L = h_{\text{нат.}}/h_{\text{мод.}} = \lambda_{\text{нат.}}/\lambda_{\text{мод.}} = H_{\text{нат.}}/H_{\text{мод.}}$), гидродинамические характеристики моделируемой волны являются: $v_{\text{мод.}} = v_{\text{натур.}}/\sqrt{\alpha_L}$, где $v = \sqrt{g\lambda/2\pi}$ – скорость движения гребня волны; $t_{\text{мод.}} = t_{\text{нат.}}/\sqrt{\alpha_L}$ – период волнового движения;

$m_{\text{мод.}} = m_{\text{нат.}} / (L_L)^3$ – масса камня (фасонного блока); $W_{\text{мод.}} = W_{\text{нат.}} / \alpha_L^3$ – объем камня (фасонного блока); $\Omega_{\text{мод.}} = \Omega_{\text{нат.}} / (\alpha_L)^2$ – общая площадь камня (фасонного блока); $E_{\text{мод.}} = E_{\text{нат.}} / \alpha_L$ – модуль упругости; $\varepsilon_{\text{мод.}} = \varepsilon_{\text{нат.}}$ – относительная деформация упругости; $\alpha_{\text{мод.}}^\circ = \alpha_{\text{нат.}}^\circ$ – угол наклона; $(\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{мод.}} = (\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{нат.}}$ – коэффициент водопроницаемости каменной наброски (блоков); $F_{\text{мод.}} = F_{\text{нат.}} / (\alpha_L)^3$ – сила; $I_{\text{мод.}} = I_{\text{нат.}} / (\alpha_L)^5$ – момент инерции массы; $R_{\text{мод.}} = R_{\text{нат.}} / (\alpha_L)^2$ – коэффициент жесткости.

Пересчет характеристик модельных волн в натуру в зоне вскатывания волн на берег

Пересчет волновых модельных процессов в натуру в зоне вската волн на откос достаточно сложно. Эту трудность можно объяснить аэрацией волны в зоне обрушения, увеличением сопротивления при ее движении вниз по склону, усилением турбулентности и пульсаций внутреннего давления.

Разрушение волн на плитах берегоукрепления откосов также является сложным процессом. На результаты процессов в этой зоне влияют плотность грунта, гидродинамическое противодействие, диаметр фракций фильтра и др. Поэтому для уменьшения влияния вышеперечисленных факторов следует проводить эксперименты на крупных моделях.

На основании исследований, проведенных на трех гидротках разного масштаба (0,30×0,50×9,0 м; 0,8×1,7×50,0 м; 7,0×0,5×7,0 м) Института водного хозяйства Грузинского технического университета получены значения поправочных коэффициентов: (K_{runup}) – для высоты вскатывания гребней волн на откос, (K_p) – для волнового давления и для диаметра каменной наброски (фасонных блоков K_d).

Пересчет высоты вскатывания модельных волн на откос в натуру осуществляется по следующей зависимости:

$$(h_{\text{runup}})_{\text{нат.}} = \alpha_L (h_{\text{runup}})_{\text{мод.}} / K_{\text{runup}}, \quad (\text{IX.3.1})$$

где α_L – линейный масштаб модели; $K_{\text{runup}} = f(Re)$ – масштабный коэффициент, корректирующий высоту вскатывания волн на склон, $K_{\text{runup}} = 0,7 - 1,0$, на практике его можно получить с достаточной точностью для каменной кладки $K_{\text{runup}} = 0,85$, для бетонных массивов – $K_{\text{runup}} = 0,7 - 0,8$.

Пересчет максимального давления ($P_{\text{мод.}}$) модельной волны в натуру ($P_{\text{нат.}}$) осуществляется по формуле:

$$P_{\text{нат.}} = \frac{P_{\text{мод.}}}{K_p / \alpha_L}, \quad (\text{IX.3.2})$$

где α_L – линейный масштаб модели; $P_{\text{нат.}}$ – максимальное волновое давление в натуре; K_p – масштабный коэффициент давления – $K_p = 0,6 - 1,0$; для практических расчетов с достаточной точностью $K_p = 0,8$.

Пересчет модельного максимального диаметра камня ($d_{\text{мод.}}$) (блоков) в натуру осуществляется по зависимости:

$$d_{\text{нат.}} = \frac{d_{\text{мод.}}}{\alpha_L K_d}, \quad (\text{IX.3.3})$$

где $d_{\text{мод.}}$, $d_{\text{нат.}}$ – диаметр камня (фасонных блоков) модели и природы; α_L – линейный масштаб; K_d – масштабный поправочный коэффициент диаметра камня (фасонных блоков), величина которого зависит от формы камня (блока) и числа Рейнольдса (Re). На практике с достаточной точностью можно принять: для камня любой формы (блока) $K_d = 1,4$, а для округленного камня – $K_d = 1,2$.

Значение коэффициентов проницаемости модельной и натурной каменной наброски (блоков) подтверждается теоретическим анализом уравнения движения жидкости [Аравин В.С., Нумеров С.Н., 1953, Кристен Н.И., 1961].

Отношение объема пор в наброске к общему объему наброски (блоков) имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{пор.}}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \text{grad} P^* + gJ = 0, \quad (\text{IX.3.4})$$

где $P^* = P + gpZ$.

Если ввести это значение в (IX.3.4), получим:

$$\frac{1}{\rho} \text{grad} P^* = \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \text{grad} gZ, \quad (\text{IX.3.5})$$

или

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{пор.}}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \text{grad} P + gJ + \text{grad} gZ = 0, \quad (\text{IX.3.6})$$

Соответственно для модели:

$$\frac{1}{(\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{мод.}}} \frac{\partial \bar{v}_{\text{мод.}}}{\partial t_{\text{мод.}}} + \frac{1}{\rho} \text{grad} P_{\text{мод.}} + gJ_{\text{мод.}} + \text{grad} gZ_{\text{мод.}} = 0, \quad (\text{IX.3.7})$$

Для идентичной жидкости природы:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \text{grad} P_{\text{мод.}} &= \frac{1}{\rho} \text{grad} P_{\text{нат.}} \\ \text{grad} gZ_{\text{мод.}} &= \alpha_L \text{grad} gZ_{\text{нат.}} \end{aligned} \quad (\text{IX.3.8})$$

Тогда для выполнения подобия необходимы два условия:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{нат.}}} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{нат.}} &= \frac{1}{(\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{мод.}}} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{мод.}} \\ gJ_{\text{нат.}} &= gJ_{\text{мод.}} \end{aligned} \quad (\text{IX.3.9})$$

По законам гравитационного подобия – $v_{\text{мод.}} = a_L^{0.5} v_{\text{нат.}}$ и $t_{\text{мод.}} = a_L^{0.5} t_{\text{нат.}}$, тогда

$$\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{мод.}} = \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{нат.}}.$$

Для выполнения равенства (IX.3.9) требуется условие:

$$\frac{1}{(\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{нат.}}} = \frac{1}{(\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{мод.}}} \text{или } (\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{нат.}} = (\varepsilon_{\text{пор.}})_{\text{мод.}} \quad (\text{IX.3.10})$$

Т.о., достаточно, чтобы коэффициенты пористости были равны в модели и в натуре. При пересчете двумерной волны, полученной в лабораторных условиях, в натурную трехмерную волну, как правило, при расчете высоты волны следует использовать следующее соотношение [Смирнов А.А., 1960]:

$$h_{\text{двухм. 1\%}}^{\text{нат.}} = h_{\text{трехм. 1\%}}^{\text{нат.}} \cdot 0,83 \quad (\text{IX.3.11})$$

IX.4. РАЦИОНАЛЬНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Необходимое и достаточное количество экспериментов определяется с помощью методики инженерно-рационального факторного рандомизированного планирования с составлением греко-латинских квадратов (4×4) [Шенк Х., 1972].

Этот метод можно использовать в виде произведения независимых отдельных переменных. Например, для формулы пятифакторной скорости вската волны на откос, которая записывается в виде:

$$V_{runup} = K \cdot f(\lambda/h) \cdot f(m) \cdot f(K_r) \cdot f(h_H) \cdot (H_i), \quad (\text{IX.4.1})$$

где K – постоянная, $f(\lambda/h)$ – крутизна волн, $m = ctga$ – уклон откоса, K_r – шероховатость и пористость откоса, h_H – высота волны на «глубокой» воде, H_i – глубина «глубокой» воды ($H_i \geq \lambda_H/2$) – составлены квадраты опытов, где переменные (λ/h), m , K_r , h_H , H_i) выбраны на четырех уровнях (табл. IX.4.1):

Таблица IX.4.1

Расчетные квадраты

$m \backslash \lambda_H/h_H$	10	13	15	20
1	2	3	4	5
9,5	$H_1=0,25$ м $K_{r1}=0,55$	$H_2=0,20$ м $K_{r2}=0,70$	$H_3=0,15$ м $K_{r3}=0,85$	$H_4=0,30$ м $K_{r4}=1,00$
6,3	$H_2=0,20$ м $h_{H1}=0,1$ м	$H_1=0$ м $h_{H2}=0,25$ м	$H_3=0,30$ м $h_{H4}=0,50$ м	$H_4=0,60$ м $h_{H3}=0,35$ м
3,0	$H_2=0,10$ м	$H_1=0$ м	$H_3=0,60$ м	$H_4=1,20$ м
8,1	$H_2=0,15$ м $K_{r4}=1,0$	$H_4=0,30$ м $K_{r3}=0,85$	$H_1=0,25$ м $K_{r2}=0,70$	$H_1=0$ м $K_{r1}=0,55$
5,1	$H_3=0,30$ м $H_{H3}=0,25$ м	$H_4=0,60$ м $H_{H1}=0,10$ м	$H_2=0,20$ м $h_{H4}=0,35$ м	$H_1=0$ м $h_{H2}=0,10$ м
2,4	$H_3=0,60$ м	$H_4=1,20$ м	$H_2=0,10$ м	$H_1=0$ м
7,1	$H_1=0$ м $K_{r2}=0,70$	$H_3=0,25$ м $K_{r4}=1,0$	$H_4=0,30$ м $K_{r1}=0,55$	$H_2=0,15$ м $K_{r3}=0,85$
4,1	$H_1=0$ м $H_{H3}=0,35$ м	$H_2=0,20$ м $H_{H4}=0,50$ м	$H_4=0,60$ м $h_{H1}=0,5$ м	$H_3=0,30$ м $h_{H2}=0,25$ м
1,9	$H_1=0$ м	$H_2=0,10$ м	$H_4=1,20$ м	$H_3=0,30$ м
6,4	$H_3=0,25$ м $K_{r3}=0,85$	$H_4=0,45$ м $K_{r2}=0,55$	$H_1=0$ м $K_{r4}=1,0$	$H_2=0,5$ м $K_{r1}=0,20$
3,1	$H_3=0,25$ м $H_{H4}=0,50$ м	$H_4=0,30$ м $H_{H3}=0,35$ м	$H_1=0$ м $h_{H1}=0,10$ м	$H_2=0,20$ м $h_{H2}=0,25$ м
0,9	$H_3=0,25$ м	$H_4=0,60$ м	$H_1=0$ м	$H_2=0,10$ м

Для каждой строки, где учитываются действующие факторы, составляются четыре логарифмических уравнения. Например, для строки, где учитывается фактор (m), уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}
(\log v_{runup})_1 &= \log f_1(\lambda_H/h_{H1}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r1}) + \log f_4(h_{H1}) + \log f_5(H_1), \\
(\log v_{runup})_2 &= \log f_1(\lambda_H/h_{H2}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r2}) + \log f_4(h_{H2}) + \log f_5(H_2), \\
&\qquad\qquad\qquad (IX.4.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\log v_{runup})_3 &= \log f_1(\lambda_H/h_{H3}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r3}) + \log f_4(h_{H3}) + \log f_5(H_3), \\
(\log v_{runup})_4 &= \log f_1(\lambda_H/h_{H4}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r4}) + \log f_4(h_{H4}) + \log f_5(H_4).
\end{aligned}$$

Суммируя эти четыре уравнения, имеем:

$$\begin{aligned}
\sum \log(v_{runup}) &= 4 \log f_2(m_1) + \log[f_1(\lambda_H/h_{H1}) \cdot f_1(\lambda_H/h_{H2}) \cdot f_1(\lambda_H/h_{H3}) \cdot f_1(\lambda_H/h_{H4})] + \\
&\quad + \log[f_3(K_{r1}) \cdot f_3(K_{r2}) \cdot f_3(K_{r3}) \cdot f_3(K_{r4})] + \log[f_4(h_{H1}) \cdot \\
&\quad \cdot f_4(h_{H2}) \cdot f_4(h_{H3}) \cdot f_4(h_{H4})] + \log[f_5(H_1) \cdot f_5(H_2) \cdot f_5(H_3) \cdot f_5(H_4)] \quad (IX.4.3)
\end{aligned}$$

Выполнив аналогичную процедуру для второй, третьей и четвертой строк, получим:

$$\begin{aligned}
\log f_2(m_1) &= \frac{\sum \log v_{runupm1} - const}{n} \\
\log f_2(m_2) &= \frac{\sum \log v_{runupm2} - const}{n} \quad (IX.4.4) \\
\log f_2(m_3) &= \frac{\sum \log v_{runupm3} - const}{n} \\
\log f_2(m_4) &= \frac{\sum \log v_{runupm4} - const}{n},
\end{aligned}$$

где (n) — количество уровней расчетов. Логарифмы результатов по уровню (m) усредняются, а влияние остальных четырех факторов не меняется при переходе с одного уровня расчета на другой. Т.о., все изменения результатов усредненных логарифмов определяются влиянием только одной переменной. Аналогичные расчеты выполняются для всех остальных переменных $(K_r, h_H, H_i, h_H, h_H/\lambda_H)$. Анализ функций проводится для антилогарифмов. При расчете таблицы кривые для всех функций составляются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
V_{\lambda h} &= K_1 \cdot f_1(\lambda_H/h_H); \\
V_m &= K_2 \cdot f_2(m); \\
V_r &= K_3 \cdot f_3(K_r); \\
V_h &= K_4 \cdot f_4(h_H); \\
V_H &= K_5 \cdot f_5(H),
\end{aligned} \quad (IX.4.5)$$

где K — постоянная.

При окончательном расчете получается зависимость скорости вската волны на откос:

$$V_{runup} = K \cdot (V_m) \cdot (V_{\lambda h}) \cdot (V_h) \cdot (V_r) \cdot (V_H), \quad (IX.4.6)$$

где $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5$.

Все остальные эксперименты планируются и обрабатываются аналогичным образом. Формула (IX.4.6) рассчитывается с использованием вспомогательных графиков или таблиц.

С использованием предварительного инженерного планирования экспериментов можно сократить время и количество экспериментов, а также свести к минимуму возможные ошибки.

Х. МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ВОДОХРАНИЛИЩ

Системный анализ воздействия различных факторов на окружающую среду включает три этапа: описательный (эмпирический), научный (теоретический) и экспериментальный [Мирцхулава Ц. Е., 1975, 2000; Odilavadze T., Bziava K., Bagration-Davitashvili A., Inashvili I., 2017; Baryczko K., Bartoszek L., Koszelnik P., Rak I.R., 2018].

На описательном (эмпирическом) этапе важное значение имеет теория познания, которая находит отражение в восприятии объективной реальности событий. На этом этапе формируется существующее, относительно поверхностное представление о текущих процессах. На этом этапе не происходит основательное изучения явлений [Глушков В.М., 1969].

Научный (теоретический) этап предполагает изучение всей структуры явлений, раскрытие сущности, формирование существующих причин, событий, категорий, законов и научных теорий. Теоретические методы позволяют глубоко заглянуть в тот или иной процесс и обнаружить еще не установленные закономерности, помогающие раскрыть объективную истину.

При изучении процессов, происходящих в водохранилищных системах, необходимо проводить экспериментальные исследования в **лабораторных и полевых условиях**.

При этом могут наблюдаться некоторые неточности. Например, несмотря на то, что штормовые явления на водохранилище повторяются каждый год, максимальное значение волновых элементов (высота, длина, период) являются случайной величиной, зависящей от ряда основных и второстепенных факторов [Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2010 (на грузинском языке)]. Детерминированный метод надежен, если малыми отклонениями переменной можно пренебречь; этот метод менее надежен, если за случайными отклонениями следуют существенные изменения [Мирцхулава Ц.Е., 2003; Дохнадзе Г., 2007 (на грузинском языке)].

Решение следует искать с использованием математической статистики, теории вероятностей, распознавания образов, теории надежности, факторного анализа, подобию образов, интегрального и других методов [Андреев И. Д., 1959; Брайтман В.М., 1962; Горелик А.Л., Скрипкин В.Л., 1977; Окунь Я., 1976].

Х.1. ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТИ

Теория вероятности – это математическая наука, изучающая закономерности случайных событий. Основное понятие теории вероятности – **«случайное событие»**. Слово «случайный» употребляется, когда неизвестно существование какого-либо факта, процесса или характерного признака его проявления. «Событие» — это любой факт, который либо имеет, либо не имеет места.

Результат проведенного испытания или наблюдения, который всегда отражает

наступление или ненаступление того или иного факта, называется **«событием»**. Ошибка, которая никогда не произойдет ни при каком повторном испытании или наблюдении, называется **«невозможной ошибкой»**, а ошибка, которая обязательно произойдет при каждом испытании или наблюдении, называется **«неизбежной ошибкой»**.

Такое событие, когда ожидается, что оно произойдет или не произойдет во время эксперимента или наблюдения, называется **«случайным событием»**.

Любое **«числовое значение вероятности возникновения частоты»** представляет собой дробь, числитель которой – количество повторений события, а знаменатель – общее количество случаев. Такая вероятность рассчитывается апостериорно или после эксперимента.

При увеличении числа независимых испытаний величина конкретных явлений постепенно стабилизируется и указанное соотношение приближается к постоянному значению. Эта величина является **«вероятностью события»**.

Количество данных полевых наблюдений различных параметров связано с точностью расчетов. Очевидно, что чем больше число наблюдений, тем точнее результаты. Такая информация получается с использованием существующих теоретических и экспериментальных исследований и аналогий.

Если объем получаемой первичной информации невелик и к нему невозможно применить статистические методы, то целесообразно использовать **метод Монте-Карло**. Этот метод позволяет получить максимум информации из имеющихся данных. Суть этого метода заключается в следующем: по имеющимся данным наблюдений составляется интегральная функция распределения, затем – с помощью таблиц случайных чисел, методом розыгрыша генерируется любое количество необходимых случайных величин.

Х.2. ОЦЕНКА НАБЛЮДЕННЫХ ОШИБОК

В ходе наблюдения следует выделить основные определяющие факторы. Выбор главных факторов учитывает желаемую и ожидаемую форму кривой распределения случайной величины. В каждом конкретном случае целесообразно определять соотношение между фактическими и измеренными значениями. Среднее арифметическое, среднее геометрическое, среднее квадратическое, медиана, мода и математическое ожидание – являются истинным значением переменной [Уорсинг. А., Геффнер Дж., 1949].

Ошибка представляет собой разницу между зарегистрированным и истинным значением наблюдений. Изменчивость ошибок сопутствует всем сериям измерений величин; каждая ошибка состоит из множества более мелких ошибок, а все элементарные ошибки вводятся со знаком «плюс» и «минус». В ходе испытаний в каждом регистрируемом результате обязательно будет та или иная ошибка, совокупность которых можно свести к трем группам: грубые, систематические и случайные ошибки.

Грубая (аномальная) ошибка удаляется из наблюдений, поэтому необходимо получить новые показания.

В процессе наблюдения остается незамеченным наличие подобных фактов, по которым игнорируются члены статистического ряда с сомнительной значимостью [Мирицхулава Ц.Е., 1974; Уорсинг А., 1949; Шенк Х., 1972].

Наиболее распространенным критерием является так называемое «**Правило трех сигм**». По данным наблюдения следует составить вариационный ряд по убыванию или возрастанию, где будут фиксироваться минимальное (X_{min}) и максимальное (X_{max}) значения переменной. По этим же данным вычисляются среднее значение переменной (\bar{X}), среднеквадратичное отклонение (σ), разность между средним значением и крайними значениями ряда данных. Если $(\bar{X} - X_{min}) < 3\sigma$, то минимальное и максимальное значения переменной остаются членами вариационного ряда данных, а при $(\bar{X} - X_{min}) > 3\sigma$ соответствующие значения переменных (X_{min} или X_{max}) исключаются из ряда наблюдений. Для оставшихся членов ряда наблюдений анализ повторяется теми же расчетами.

Систематические ошибки – это ошибки, сопровождающие измерения. Можно определить их причины (отказ прибора, округление результатов расчета и др.). Наличие систематических ошибок, вызванных влиянием отдельных факторов, выявляется на основании специальных исследований. Выявленные систематические ошибки исправляются путем внесения соответствующих поправок в результаты измерений.

Случайные ошибки рассматриваются как величины, которые нельзя исключить или игнорировать. Влияние таких явлений на истинное значение переменной оценивается с помощью методов теории вероятностей и их модификаций.

Х.3. ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ФАКТОРОВ

Интенсивность и риск – основные понятия уязвимости гидротехнических сооружений. Уязвимость – это свойство, показывающее способность объекта противостоять внешним и внутренним воздействиям.

Одним из основных мероприятий по снижению интенсивности выхода объекта из строя является своевременная оценка уязвимости и планирование стратегии противодействия. Наблюдения за уязвимыми объектами показали, что чем более уязвим объект к внутренним и внешним воздействиям, тем он менее надежен.

Как долго будет работать объект, всегда привлекало внимание специалистов и ученых. Продолжение периода безопасной эксплуатации объекта в критическом (кризисном) состоянии требует выявления доминирующих факторов, определяющих функционирование объекта. Например, прогноз критического предела загрязнения водохранилищ осуществляется с использованием диалектического закона развития системы [Колмогоров А.Н., 1938; Свешников Л.А., 1993; Мирицхулава Ц.Е., 1993; 1999; 2003; 2005]. Согласно этому закону результат развития системы зависит от двух тенденций, одна из которых тормозит, а другая способствует процессу развития. При оценке критического состояния водохранилища необходимо определить соответствующее действие нагрузок, а

затем – предельные характеристики сопротивления.

Согласно методике оценки уязвимости объектов, разработанной Ц.Е.Мирцхулава, объект становится уязвимым после определенной деградации (утраты определяющих свойств), которая вызвана влиянием многих факторов [Мирцхулава Ц.Е., 2006].

Согласно предлагаемому методу изменение во времени основного параметра (y), определяющего процесс деградации объекта, описывается стохастическим дифференциальным уравнением:

$$dy(t) = m(t)dt + \sigma(t) dx(t), \quad (X.3.1)$$

где $m(t)$ и $\sigma(t)$, соответственно – средняя скорость изменения параметра и его среднее квадратичное отклонение, $dx(t)$ – составляющая нормального распределения.

С помощью уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова и ряда математических преобразований получена зависимость для расчета времени появления уязвимости (t):

$$t = \mu \left[\frac{2+z^2v^2 \pm \sqrt{(4+z^{-1}v^{-1})z^2v^2}}{2} \right], \quad (X.3.2)$$

где μ – граничное значение основного параметра, определяющего процесс деградации, при достижении которого объект становится уязвимым; z – статистический запас сопротивления, определяющий работу объекта до достижения уязвимого состояния; $1,00 \leq z \leq 4,99$; v – коэффициент вариации, представляющий собой отношение средне-квадратичного отклонения переменной к среднему значению:

$$v = \frac{\sigma}{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n}}, \quad (X.3.3)$$

где K_i – коэффициент модуля, представляющий собой отношение конкретного значения переменной к среднему значению.

При решении задач можно столкнуться со следующими ситуациями: данных наблюдений достаточно, недостаточно или их практически нет.

При **отсутствии наблюдений** информацию получают по аналогам. При **недостаточном количестве** наблюдений используется Бутстред-метод, Монте-Карло или метод экспертной оценки.

При **достаточном количестве** наблюдений применяют статистический анализ данных с помощью корреляционного метода.

Задача 1.

Как долго (t) Сионское водохранилище будет находиться в состоянии нормальной эксплуатации при уровне надежности $P=0,97$ и риске $r=0,03$, если среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0,049$, а коэффициент вариации $v = \frac{\sigma}{m} = \frac{0,049}{18,9} = 0,0026$, где значение (m) определено по нашим исследованиям. Средняя скорость накопления фосфора (в виде остатка) в Сионском водохранилище $m_{\text{ср.}} = 18,9$ т/год (т.е. 0,058 мг/л) (табл. X.3.1) [Иорданишвили И., Иорданишвили К., Хосрошвили Э. (на грузинском языке), 2013].

Таблица Х.3.1

Расчет остаточной загрузки от фосфора (Б_{ф.в.}) в Сионском водохранилище

Источники загрязнения	Нагрузка по фосфору ФН, тонн в год	Поглощенный фосфор ФП, тонн в год	Остаточный фосфор ФО=ФН-ФП, тонн в год	Уклон откоса в градусах	Мощность мероприятий против накопления фосфора (в баллах)
Птицеводство	0,046	0,028	0,018	7°	7
Свиноводство	18,00	0,006	17,99	6°	6
Скотоводство	0,582	0,041	0,541	8°	5
С селитебных территорий:					
С. Сиони	0,439	0,442	поглощен	5°	–
С. Чекуриант-гори	0,263	0,377	–	8°	–
Пахотные земли	0,239	0,07	0,169	7°	4
Всего	19,57	0,964	18,72	7°	–

Предельное значение определяющего параметра – фосфора по экологическим позициям качества воды равно 3,0 мг/л. Тогда предельное значение фосфора, которое может накопиться в Сионском водохранилище за год, равно:

$$m_{\text{пред.}} = V_{\text{полн.}} \cdot 3,0 \text{ мг/л} = 325\,000\,000\,000 \text{ л} \cdot 3,0 \text{ мг/л} = 1000 \text{ т/год.}$$

Значениям риска $r = 0,03$ и надежности $P = \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \rho^{\frac{x^2}{2}} dx = 0,97$ соответствует соответствующее значение $z = 1,88$, которое приводится в справочнике по теории надежности и вероятности [Колмогоров А.Н., 1938]. Выдержка из этих данных представлена в таблице Х.3.2.

Таблица Х.3.2

Z	Φ(Z)=P	Z	Φ(Z)=P	Z	Φ(Z)=P
0	0,5000	2,0	0,97725	4,0	0,9 ⁴ 68
0,5	0,6915	2,5	0,9 ² 37	4,5	0,9 ⁵ 66
1,0	0,8413	3,0	0,9 ² 86	5,0	0,9 ⁶ 00
1,5	0,93319	3,5	0,9 ³ 76		

Тогда продолжительность нормальной работы Сионского водохранилища равна:

$$t = \frac{1000}{18,9} \left[\frac{2+1,88^2 \cdot 0,0026^2}{2} \pm \frac{\sqrt{(4+1,88^2 \cdot 0,0026^2)1,88^2 \cdot 0,0026^2}}{2} \right] = 53 \text{ год.}$$

Т.о., вероятное время ввода Сионского водохранилища в уязвимое состояние (без учета водообмена) может быть достигнуто через 53 года эксплуатации. Понятно, что чем выше коэффициент водообмена водохранилища, тем более устойчиво водохранилище к загрязняющим веществам.

Рассмотренный пример нельзя считать единственно правильным решением, так как неблагоприятное состояние водохранилища может быть вызвано сбросом радиоактивных

загрязнений или других веществ, даже незначительное количество которых может вызвать более раннее уязвимое его состояние.

Задача 2.

Определяющим параметром при расчете срока службы Жинвальского водохранилища от капитальных строений является интенсивность абразии. По нашим исследованиям установлено, что дачные строения со своими коммуникациями расположены на правом берегу Жинвальского водохранилища на расстоянии всего 30 м. Сколько времени потребуется для наступления уязвимости (абразии) у дачных строений, расположенных в 30 м от НПУ водохранилища, если $P = 0,975$, $r = 0,025$, $z = 1,96$.

На основании ежемесячных наблюдений за интенсивностью абразии берега установлено, что скорость абразии составляет $m = 0,09$ м/мес. Дачные строения станут уязвимыми, если берег приблизится к водной поверхности водоема на 5 м, то есть когда ширина абразионного берега достигнет $30 - 5 = 25$ м. При обработке статистических дачных было определено, что $m = 0,09$, $\sigma = 0,01$, $\nu = 0,25$.

Приведенное значение надежности $P = 0,975$ соответствует нормированному значению $z = 1,96$. Тогда время, необходимое для определения уязвимого состояния данных строений, составит (т.е. для $30 - 5 = 25$ м абразии берега водоема):

$$t = \frac{25}{0,09} \left[\frac{2 + 1,96^2 \cdot 0,25^2}{2} \pm \frac{\sqrt{(4 + 1,96^2 \cdot 0,25^2)1,96^2 \cdot 0,25^2}}{2} \right] = 45 \text{ лет.}$$

Задача 3.

Определяющим фактором загрязнения Сионского водохранилища является водородный индекс (Ph). Если учесть, что баланс загрязняющих веществ в Сионском водохранилище в целом относительно уравновешен, т.е. количество поступающей и вытекающей воды из водохранилищ в течение года одинаково^{*)}, также, если принять во внимание определяющий параметр – водородный показатель $Ph = 6,75$ и показатель критического состояния Сионского водохранилища $Ph = 6,5$, тогда надежная работа водохранилища рассчитывается по формуле:

$$P_{(t)} = \varphi \left[\frac{C_k - C}{\delta} \right], \quad (X.3.5)$$

где $\delta = \frac{0,2C}{6} = 0,033 \cdot 6,5 = 0,214$.

Поскольку деградация компонентов ландшафта является многофакторной величиной, тогда можно использовать нормальное распределение Гаусса, при котором допускается применение правила «трех сигм», или:

$$P_{(t)} = \varphi \left[\frac{6,5 - 6,75}{0,214} \right] = \varphi[1,168] \quad P_{(t)} = 0,91.$$

Риск $r = 1 - P = 1 - 0,91 = 0,09$. Из этого следует, что водоохранные мероприятия применимы до тех пор, пока $r < 0,01$ (табл. X.3.3). В нашем случае проведение водоохранных мероприятий уже необходимо. Аналогичные расчеты могут быть выполнены для всех типов загрязняющих веществ.

^{*)} Период водообмена в Сионском водохранилище составляет один год

Значения рисков в соответствии с частотой нежелательных событий

$r > 0,2$	Риск частый – значение загрязнения намного больше значения критической нагрузки. Необходимо проводить водоохранные мероприятия.
$0,1 < r < 0,7$	Риск вероятен – загрязнение находится в пределах критического значения. Необходимо проводить водоохранные мероприятия.
$0,01 < r < 0,1$	Риск редкий – водоохранные мероприятия полезны.
$r < 0,01$	Риск очень редкий – проводить водоохранные мероприятия не обязательно.

Т.о., с помощью теории надежности и риска формулируется задача оценки состояния водохранилищ. Принятые модели и критерии, позволяют определять условия потенциальной опасности от действия различных загрязняющих факторов; естественно, принятые решения требуют дальнейших исследований.

Х.4. МЕТОД ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ФАКТОРОВ (ДЕЛЬФИ)

В области изучения гидравлики волн к настоящему времени накоплено и распространено много противоречивых методов. Существуют противоречивые взгляды на характер процессов, нет единства в количественной оценке определяющих факторов и критериев, а также существуют противоречивые взгляды на методы моделирования. Количество расчетных формул увеличивается. В то же время уровень развития науки уже требует современного решения проблемы. Это возможно с помощью системных методов – **экспертной оценки, факторного анализа и распознавания образцов.**

Основными этапами **экспертных оценок** при изучении волновых процессов на водохранилищах являются: организация экспертов; проведение экспертизы путем заполнения универсальной анкеты; анализ и обработка результатов экспертизы; составление программы оценки результатов экспертизы по балльной системе [Глушков М. О., 1969].

Экспертная оценка факторов проводилась **в два этапа.**

На **первом этапе** обрабатываются все возможные рекомендации по прогнозированию волнения на водохранилищах, по результатам которых анализируется существующая научная литература. На основе анализа каждого литературного источника были собраны данные о факторах и их информативности. Затем составлен список авторов и год публикации в хронологическом порядке, дается перечень всех коэффициентов, формул и пределов их использования [И. Иорданишвили, 1998 (на грузинском языке)]. Например, на основе всех имеющихся работ, посвященных изучению трансформации высоты волн на откосе, установлен список авторов и их расчетных формул.

На **втором этапе** (непосредственный опрос экспертов) составляются анкеты, строки которых содержат анализ всех факторов, приведенных в научной литературе, а в столбцах приведены три группы факторов по степени их влияния. Для оценки веса фактора по степени влияния была принята следующая схема: сильное влияние – 5, среднее – 3 и слабое

– 1 балл. За границы трех групп факторов приняты следующие три схемы:

I схема – более 4 баллов, II схема – 4 балла и III схема – менее 2 баллов.

При проведении данного этапа исследования у нас не было возможности встретиться непосредственно с рядом исследователей, поэтому мнение исследователей было сформировано на основе анализа предложенных ими формул: в первую очередь отмечается основной действующий фактор; затем – факторы, влияние которых менее интенсивно, и так далее.

На основе анализа полученных данных была составлена таблица матрицы априорного ранжирования (ранга) факторов, влияющих на высоту трансформируемой волны на откосе. В ходе анализа выделяют следующие семь основных факторов: 1) уклон откоса $X_1(m)$; 2) крутизна волны на «глубокой» воде $X_2(h_H / \lambda_H)$; 3) расчетная глубина $X_3(H)$; 4) коэффициент шероховатости $X_4(K_r)$; 5) высота волны на «глубокой» воде $X_5(h_H)$; 6) угол подхода фронта волны к берегу $X_6(\beta)$; 7) обеспеченность высоты волны $X_7(p\%)$.

Степень совпадения мнений всех экспертов определяется на основании значения коэффициента конкордации (K), характеризующего совпадение мнений экспертов и степени его случайности:

$$K = \frac{S}{1/12N^2(n^2-n) - n \sum_{i=1}^n T_i^2}, \quad (\text{X.4.1})$$

где S – сумма квадратов отклонений, N – количество экспертов, n – количество рангов i -го признака в каждой строке ранговой матрицы; T_i – отклонение от средней суммы рангов.

Полученное в результате расчета значения коэффициента конкордации свидетельствует о несовпадении мнений специалистов. По средней априорной диаграмме рангов определяются наиболее важные факторы. Метод экспертной оценки действующих факторов является априорным.

Пример 1.

Пример экспертной оценки факторов (Delphi), влияющих на трансформацию высоты волны (h_i) на откосе

Экспертную оценку факторов, влияющих на трансформированную высоту волны (h_i) на склоне, проводили с использованием анализа существующих формул. Составлена таблица матрицы ранжированных априорных рангов факторов (табл. X.4.1; X.4.2). При анализе выделяют **семь основных факторов**: крутизна склона $X_1(m = \text{ctg} \alpha)$, крутизна волны на «глубокой воде» $X_2(h_H / \lambda_H)$, расчетная глубина воды $X_3(H)$, коэффициент шероховатости откоса $X_4(K_r)$, высота волны на «глубокой» воде $X_5(h_H)$, угол подхода фронта волны к берегу $X_6(\beta)$, обеспеченность высоты волн $X_7(p\%)$.

Таблица Х.4.1

Экспертная оценка существующих основных формул трансформации высоты волны (h_i) на откосе

№	Автор	Год	Формула	Сокращенная формула	Фактор глубины воды (H_i) и высоты глубоководной волны (H_H)	Значение дополнительного коэффициента	Границы использования
1	2	3	4	5	6	7	8
Формулы, полученные на основе натурных исследований							
1	Гаяр	1914	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{h_H}{H_i}\right)^{1/2}$	$h_i = \left(\frac{h_H}{H_i}\right)^{1/2} \cdot h_H$			$m=1:100;$ $t=const;$ $H_H = \frac{\lambda_H}{3}$
2	Кузнецов П.А.	1944	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{1 - 0,012 \frac{\Delta\lambda}{0,5(H_i - H_H)}}{\sqrt[4]{\frac{H_H}{K(H_i + H_H)}}}$	$h_i = K_H \cdot h_H \cdot \left(\frac{h_H}{H_i}\right)^{1/2}$	$K_H = \left[1 - \frac{0,09\lambda_H}{H_i + H_H} \times \frac{1}{l^k(H_i + H_H)}\right]^{1/2}$		$\frac{\lambda_H}{h_H} = const$ $\Delta\lambda = (10 - 20)h_H$
3	Бигелу Т. Эдмондсон В.	1951	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{2n} \frac{U_i}{U_H}}$	$h_i = K_H^{1/2} \cdot K_W^{1/2} \cdot h_H$	$K_H = (1 + \frac{2kH_i}{St2kH_i})$	$K_u = \frac{U_i}{U_0}$	
4	Шишов Н.Д.	1952	$\frac{h_i}{h_H} = 1,2 \sqrt{\frac{H_H}{H_i}}$	$h_i = 1,2h_H \cdot \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{1/3}$			$\rho = 1\%$ $i < 0,02 \div 0,03$
5	Городецкий С.Д.	1954	$\frac{h_i}{h_H} = l^{0,123(H-H_H)}$	$h_i = 1,2h_H \cdot \left(\frac{H_H}{H_i}\right) \sqrt[3]{1}$			$\rho = 1\%$ $i < 0,02 \div 0,03$
6	Иванов А.А.	1955	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{\sqrt{H_i}}{\sqrt{H_i - b\lambda_H}}$	$h_i = K_H h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{-1/2}$	$K_h = \left[\frac{H_h}{H_i + 0,2K_m\lambda(1 + \frac{H_i + H_H}{2})} \right]^{1/2}$	$K_m = \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2$	
7	Виленский И.Г. Глуховский Б.Х.	1957	График: $h_{i\%} = f\left(\frac{H_H}{H_i}\right)$				

1	2	3	4	5	6	7	8
Формулы, полученные на основе лабораторных экспериментов							
8	Божич П.К.	1948	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{H_i}{H_H}}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{-1/2}$			$m = 6 \div 250, 35\lambda_H \geq H_H \geq 0,1/\lambda_h$
9	Божич П.К.	1949	$\frac{h_i}{h_H} = 1,74 \sqrt{\frac{H_i}{\lambda_H}}$	$h_i = K_\lambda h_H \left(\frac{\lambda_H}{H_i}\right)^{-1/2}$	$K_\lambda = \left(\frac{3H_i}{\lambda_{H_i}}\right)^{1/2}$		$0,35\lambda_H \geq H_H \geq 0,25/\lambda_H$
10	Смирнов А.А.	1960	$\frac{h_i}{h_H} = 0,56 \sqrt{\frac{\lambda_H}{H_i}}$	$h_i = K_\lambda h_H \left(\frac{\lambda_H}{H_i}\right)^{-1/4}$	$K_\lambda = 0,56 \left(\frac{\lambda_H}{H_i}\right)^{1/4}$		$0,02 \leq i \leq 0,2;$ $\frac{H_i}{H_H} < 0$
11	Кожевников М.Р.	1972	график: $\frac{h_i}{h_H} = f\left(\frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$				$\frac{h_H}{\lambda_H} = 0,02 \div 0,1$
12	Эри	1945	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[4]{\frac{H_H}{H_i}}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{1/4}$			$t = const$ $E = const$
13	Стокс	1880	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{ctgKH_i}{2KH_i} + \frac{Sh2KH_i}{Sh2KH_i}}$	$h_i = h_H K_H^{1/2}$	$K_H = \frac{ctgKH_i}{2KH_i} + \frac{Sh2KH_i}{Sh2KH_i}$		$H_i < 0,5\lambda_H$
14	Андреанов З.	1939	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{-0,25K m_\Delta X + K_\lambda \lambda^{1/2}}{0,25K m_\Delta X + K_X}$	$h_i = K_H^{1/2} \cdot h_h$	$K_\lambda = \sqrt{\lambda_{i-1} \lambda_i + (\lambda_{i-1} - \lambda_i)}$	$K_m = \frac{1,07}{m} + \frac{0,016}{ShKH_{cp}}$	
15	О'Брайен М.Н.	1942	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{2H} \frac{U_i}{U_H}}$	$h_i = K_H^{-1/2} \cdot K_u^{1/2} \cdot h_H$	$K_H = \left[1 + \frac{2KH_i}{sinKH_i}\right]$	$K_u = \frac{U_p}{U_i}$	
16	Минш М.П.	1944	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{thKH_i \left[1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}\right]}}$	$h_i = K_H^{1/2} \cdot h_H$	$K_H = thKH_i \left[1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}\right]$		$H_i > 0,15\lambda_H$

1	2	3	4	5	6	7	8
17	Крылов И.М.	1948	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{U_H - H_H}{UH_i}}$	$h_i = K_H h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{1/2}$		$K_u = \left(\frac{U_0}{U_i}\right)^{1/2}$	
18	Кондратьев Н.Е.	1950	$h_i = \sqrt{\frac{4N}{\gamma \left(1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}\right)}}$	$h_i = K_H^{-1/2} \cdot K_d^{1/2}$	$K_H = 1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}$	$K_u = \frac{UN}{\gamma}$	
19	Мунк в.	1951	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[3]{\left(\frac{H_H}{H_i}\right)^4}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{4/3}$			
20	Браславский А.	1952	$h_i = \left[\frac{U_0}{U} h_H^2 + \frac{8}{U} (X - X_0) \times (N_0 - N) \right]^{0.5}$	$h_i = K_u$	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{H_i}{\lambda_H}\right)^{1/5} \cdot \sqrt{\frac{2thKH_i \cdot th2KH_i}{thKH_i + th2KH_i}}$	$K_u = \left[\frac{U_0}{U} h_H^2 + \frac{8}{U} (X - X_0) \cdot (N_0 - N) \right]^{0.5}$	
21	Лабзовский Н.А.	1956	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{H_i}{\lambda_H}\right)^{1/5} \cdot \sqrt{\frac{2thKH \cdot th2KH}{thKH + th2KH}}$	$h_i = K_H h_H$	$K_H = \left(\frac{H_i}{\lambda_H}\right)^{1/5} \cdot \sqrt{\frac{2thKH_i \cdot th2KH_i}{thKH_i + th2KH_i}}$		$\lambda_H \geq H_i \geq 0$
22	Магэнс С.	1958	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{1}{2h} \cdot \frac{\lambda_H \ell_H}{\lambda_i \ell_i}$	$h_i = h_H K^{-1/2} \left(\frac{\lambda_H}{h_i}\right)^{1/2}$	$K_H = 1 + \frac{2KH_{i\Box} \cdot \ell_i}{Sh2KH_i \cdot \ell_H}$		
23	Релей	1958	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{2h_H} \cdot \frac{U_H}{U_i}}$	$h_i = K_u^{-1/2} \cdot K_H^{-1/2} \cdot h_H$	$K_H = 1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}$	$K_u = \frac{U_H}{U_i}$	
24	Логинов В.Н.	1958	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[3]{\frac{1}{2h_H} \cdot \frac{H_H}{H_i}}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{4/3}$			
25	Башкиров Г.С.	1961	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{U_H}{U_i} + \frac{8h_H}{\gamma U} \varphi_X X}$	$h_i = h_H K_u^{1/2}$		$K_u = \frac{U_0}{U} + \frac{8h_i}{\gamma h U_i} \varphi_X X$	$X = (2 + 5)\lambda$
26	Красножон Г.Ф.	1961	$\frac{h_i}{h_H} = f \left(\frac{H_i}{\lambda_i}, \frac{h_H}{t^2} \right)$				

1	2	3	4	5	6	7	8
27	Сидорова А.Г.	1972	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{2ch^2KH_i}{2KH_i + Sh2KH_i}}$	$h_i = h_H K_H^{1/2}$	$K_H = \left(\frac{2ch^2KH_i}{2KH_i + Sh2KH_i} \right)^2$		
28	Бретшнайдер К.Л.	1970	$\frac{h_i}{h_H} = K_p K_d K_\phi \left(\frac{n_u U_u}{nU} \right)^{1/2}$	$h_i = h_H K_H^{1/2} K_u^{1/2} \cdot K$	$K_H = \left(\frac{1}{\frac{2KH_i}{Sh2KH_i}} \right)^2$	$K_u = \frac{U_H}{U_i}$ $K = K_p K_d K_\phi$	
29	Гагошидзе Ш.	1973	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{\frac{S_0}{S_i} - \sin(180 - 2\alpha) + \cos(180 - 2\alpha) \cdot sh^2 K_0 H \cdot Sh^2 K_0 H \times \frac{sh^2 K_0 H}{sh^2 K_0 H} \times Shk_0 H \times thk_i H_0 K_i s}{thk_{-H} K S_i}}$	$h_i = h_H \sqrt{\frac{S_0 - K_m}{S_i} + \frac{K_m K_{\lambda H}}{K_{\lambda H}}}$	$K_{\lambda H} = Sh^2 K_0 H_i th K_0 H + th K_i H_i$	$K_m = \sin(180 - 2\alpha)$ $K_m^1 = \cos(180 - 2\alpha) K = \frac{2\pi}{\lambda_H}$	$\alpha < 0,02$
30	Пелиновский Е.Н.	1977	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{H}{H_H} \right)^{-1}$	$h = K_H \cdot h_H$	$K_H = \left(\frac{H}{H_H} \right)^{-1}$		$h \approx H^{-1} \text{одиночная волна}$
31	Войнич-Сяно- женцкий Т.Г.	1979	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[4]{\frac{\lambda H_i}{8\pi H X}}$	$h_i = K_m \cdot K_\lambda \cdot K_H$	$K_H = \sqrt[4]{\frac{1}{H_H}}, K_\alpha = \sqrt{\alpha}$ $K_\lambda = \sqrt{\lambda_H}$		$\alpha < 0,02$
32	Пелиновский Е.Н.	1981	$\frac{h_i}{h_H} = 2\pi \sqrt{\frac{2X}{\lambda_i}}$	$h_i = K \cdot K_\lambda \cdot K_x \cdot h_H$	$K_\lambda = \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$	$K = 2\pi\sqrt{2}$ $K_x = \sqrt{2}$	Волна цунами
33	Печеркин Л.Л.	1981	$\frac{h_i}{h_H} = 0,849 \left(\frac{H_H}{\lambda_H} \right)^{1,5} \frac{W}{h_H}$	$h_i = K_W \cdot K_H \cdot K_\lambda \cdot h_H$	$K_H = H^{1,5}$	$K_W = 0,849W$	$H_H < 0,6\lambda_H$
34	Кангаржи И.Г.	1995	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{H}{H_H} \left[\left(\frac{H}{H_H} \right)^{1/2} - g \right] - g^{-1/2} \frac{H_i^{-1/2} H_i^{-1/2}}{H_H^{-1/2} H_H^{-1/2}} \cdot \frac{H_H}{H_H}$	$h_i = K_H \cdot (K_H^{1/2} - g) \cdot (1 - g^{-1/2} \cdot K^{-1/2}) \cdot h_H$	$K_H = \frac{H_i}{H_H}$		$m = 50 - 20$

Матрица рангов ранжированных априорных факторов, влияющих на трансформацию высоты волны (h_i)

Таблица экспертов	$X_1(m=ctg\alpha)$	$X_2(h_H/\lambda_H)$	$X_3(H_i)$	$X_4(K_T)$	$X_5(h_H)$	$X_6(\beta)$	$X_7(m\%)$
1	2	3	4	5	6	7	8
$\sum_{i=1}^N$	36	30	84	28	130	28	28

Степень совпадения мнений всех экспертов определяется на основе коэффициента "конкордации" (K), характеризующего совпадение мнений экспертов:

$$K = \frac{S}{\frac{1}{12}T^2(N^3 - N) - N \sum_{i=1}^N T_i} = 0,75, \quad (X.4.2)$$

где S – сумма квадратов отклонений, T – количество экспертов во всех строках матрицы N рангов, число рангов i -го признака. Значение коэффициента конкордации ($K = 0,75$) свидетельствует о наличии неполной закономерности между специалистами.

Построением средней априорной диаграммы рангов определено, что наибольшее значение имеют следующие факторы: (h_H) – высота волны на глубокой воде, расчетная глубина воды H_i и ($m = ctg\alpha$) – уклон склона (рис. X.4.1).

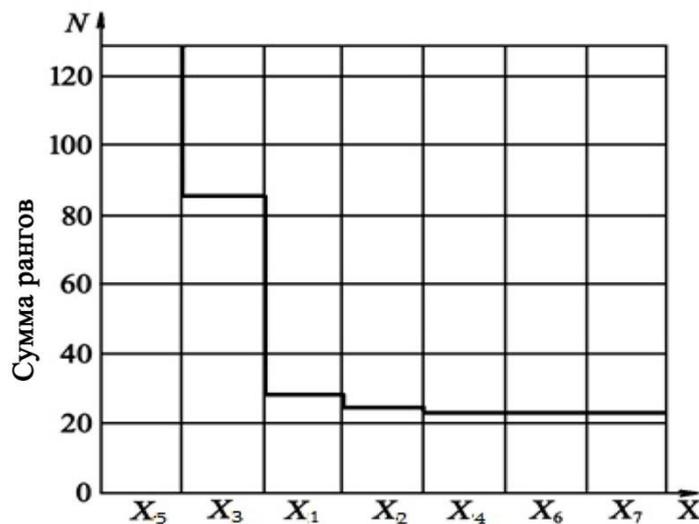


Рис. X.4.1. Априорная диаграмма средних рангов при трансформации высоты волны

Пример 2.

Оценка экологической надежности горных водохранилищ

При проектировании водохранилищ в горных районах составляется перечень ранжированных факторов экологических требований (табл. X.4.3).

Таблица X.4.3

Перечень требований экологической надежности горных водохранилищ

№	Мероприятия	Требования	Экспертная оценка	
			N	Нн
1	Водозащитные	Создание водоохранной зоны и лесной полосы вдоль рек, впадающих в водохранилище	0,9	0,1
2	Противоэрозионные	–	0,6	0,1
3	Охрана леса в бассейне водохранилища	–	0,5	0,1
4	Сохранение флоры	Сохранение растений в первозданном виде; создание заповедников	0,75	0,2
5	Сохранение фауны	Рыбозащитные меры	0,85	0,1

Значения экологической надежности получены с использованием экспертного (Delphi), метода [Мирцхулава Ц.Е., 1974; Померанец В.И., 1991; Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.И., 1996; И. Иорданишвили, 1997, 2001, 2000, 2005 (на грузинском языке)].

Влияние факторов отражается числом (M), значение которого равно $0 \div 1$. Для оценки экологической надежности водохранилищ используют значения полного ($N_{\text{полн.}}$) или неполного ($N_{\text{неполн.}}$) учета экологических требований:

$$N_{\text{полн.}} = \sum_{i=1}^n Ni; \quad N_{\text{неполн.}} = \sum_{i=1}^m Ni, \quad (\text{X.4.3})$$

где n, m – соответственно, количество всех и непредвиденных требований, $m \leq n$.

В нашем случае: $N_{\text{полн.}} = 3,6$ и $N_{\text{неполн.}} = 2,0$.

Тогда значение экологической надежности водохранилищ (R) равно [Мирцхулава Ц.Е., 1974]:

$$R = \frac{1}{2\pi} \int_{Z_0}^{\infty} e^{-0,5Z_0^2} dZ_0, \quad (\text{X.4.4})$$

$$\text{где} \quad Z_0 = (N_{\text{неполн.}} - N_{\text{полн.}}) / \sqrt{NN_{\text{неполн.}}^2 + N_{\text{полн.}}^2}, \quad (\text{X.4.5})$$

$(N_{\text{неполн.}}^2 + N_{\text{полн.}}^2)$ представляет собой сумму дисперсии. В нашем случае $N_{\text{неполн.}}^2 = 0,03$; $N_{\text{полн.}}^2 = 0,08$.

Величина экологической надежности (R) при выполнении всех требований равна – $R_{\text{полн.}} = 0,08$, а без их учета – $R_{\text{неполн.}} = 0,90$.

Х.5. МЕТОД ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

Со второй половины XX века интенсивно развивался новый метод статистических исследований – **факторный анализ** [Окунь Я., 1976]. С помощью факторного анализа можно объяснить сущность сложных явлений, определить взаимозависимые и независимые, основные и неосновные факторы. Основные положения факторного анализа можно сформулировать следующим образом: события определенного направления, несмотря на их изменчивость и неоднородность, могут быть описаны небольшим числом функциональных единиц, факторов или параметров. С помощью метода факторного анализа можно выявить и определить взаимосвязь факторов, их важность и степень влияния. С помощью метода факторного анализа можно изучить внутреннюю структуру корреляционных матриц, выявить латентные или скрытые факторы.

Процесс выделения факторов осуществляется последовательным преобразованием матрицы коэффициентов корреляции. Полученные факторные нагрузки имеют вид коэффициента и представляют собой меру зависимости рассматриваемого фактора от соответствующей переменной.

Факторный анализ является качественным, он не дает количественной оценки всех действующих факторов.

Пример 1.

В результате факторного анализа высоты гребней волн накатывающих на откос ($H_{греб}(X_9)$) горных водохранилищ выявлено что, они зависят от многих факторов. Эта задача может быть решена на основе выявления влияния следующих **восьми** факторов; начальная высота волны на глубокой воде – $X_1(h_H)$; уклон откоса – $X_2(m = \text{ctg}\alpha)$; пологость волны – $X_3(\lambda_H/h_H)$; шероховатость и пористость – $X_4(K_T)$; обеспеченность высоты волн – $X_5(m\%)$; угол подхода волн к берегу – $X_6(\beta)$; скорость ветра – $X_7(V_w)$; глубина воды – $X_8(H)$.

Задача может быть решена с помощью центроидного метода факторного анализа. В геометрической интерпретации метод предусматривает определение центра векторов и строк матрицы, а затем – перенос векторов в начало координат. Процесс разделения факторов осуществляется последовательным преобразованием матрицы коэффициентов корреляции. Полученные факторные нагрузки имеют форму коэффициента и представляют собой меру зависимости рассматриваемого фактора от соответствующей переменной.

Реализация факторного анализа осуществляется в виде программы, интерфейс которой состоит из минимального количества кнопок: «п» – открытие файла исходных данных, «R» - переход к расчету следующего фактора; «S» – сохранение фактора в файле. Для сохранения формата файла выбран формат CDV (comma delimited values) [Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., Вартанов А.М., 2010].

Первый шаг редуцированной матрицы корреляции приведен в таблице Х.5.1.

Таблица X.5.1

**Программа факторного анализа (интерфейс)
наката волны на ($h_{групп}$) откос**

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	
1	0,543	-0,194	0,005	-0,067	0,111	-0,091	0,215	0,096	0,543	
2	-0,194	0,447	0,32	0,224	0,123	0,267	0,121	0,142	-0,447	
3	0,005	0,32	0,422	0,422	0,165	0,91	0,031	-0,274	0,163	
4	-0,067	0,224	-0,422	0,422	-0,049	0,069	-0,221	0,296	0,244	
5	0,111	-0,122	-0,168	-0,049	0,163	-0,103	0,152	-0,137	-0,103	
6	-0,091	0,262	0,01	0,069	-0,103	0,371	-0,042	-0,371	-0,163	
7	0,215	-0,121	-0,091	-0,271	0,152	-0,042	0,271	-0,044	0,032	
8	0,096	0,143	-0,274	0,296	-0,137	-0,371	-0,044	0,371	0,145	
9	0,543	-0,447	0,163	0,244	0,103	-0,163	0,032	0,145	0,543	
Сумма (X)	0,618	-0,576	-1,087	0,023	-0,419	-0,429	-0,16	-0,146	0,413	1,7629411
Co13	0,607	0,064	1,087	0,367	-0,082	-0,449	0,002	0,402	0,086	2,58551449
Co16	0,789	-0,46	1,106	0,73	0,123	0,449	0,087	1,144	0,412	4,37991439
Co12	1,178	0,46	0,466	0,282	0,368	0,973	0,329	0,358	1,307	6,22189824
Фактор	0,55	-0,29	-0,284	0,225	0,172	-0,43	0,192	0,393	0,591	1,11887768

Корреляционная матрица R составляется по данным высоты наката волн на откос ($h_{групп}(X_9)$), (табл. X.5.2). Окончательная матрица R действующих факторов приведена в таблице X.5.3.

Таблица X.5.2

Исходная матрица корреляции

Тесты	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1	1	-0,194	0,005	-0,067	0,111	-0,091	0,215	0,096	0,543
X2	-0,194	1	-0,32	0,224	-0,122	0,262	-0,121	0,143	-0,447
X3	0,005	-0,32	1	-0,422	-0,168	0,01	-0,081	-0,274	0,163
X4	-0,067	0,224	-0,422	1	-0,049	0,069	-0,271	0,296	0,244
X5	0,111	-0,122	-0,168	-0,049	1	-0,103	0,152	-0,137	-0,103
X6	-0,091	0,262	0,01	0,069	-0,103	1	-0,042	-0,371	-0,163
X7	0,215	-0,123	-0,081	-0,271	0,152	-0,042	1	-0,044	0,032
X8	0,096	0,143	-0,274	0,296	-0,137	-0,371	-0,044	1	0,145
X9	0,543	-0,447	0,163	0,244	-0,103	-0,163	0,032	0,145	1

Таблица X.5.3

Окончательная корреляционная матрица восьми действующих факторов

Факторы	Нагрузка действующих факторов								
	$H_H(X_1)$	$m(X_2)$	$\lambda_H/H_H(X_3)$	$K_f(X_4)$	$m\%(X_5)$	$\beta(X_6)$	$V_w(X_7)$	$H(X_8)$	$h_{групп}(X_9)$
F1	0,55	-0,29	-0,284	0,225	0,172	-0,43	0,192	0,393	0,591
F2	-0,382	0,523	-0,491	0,481	-0,111	0,075	-0,307	0,509	-0,296
F3	0,266	0,084	0,156	0,33	-0,42	0,2	-0,269	0,122	0,515
F4	0,189	0,39	-0,479	0,17	0,23	0,435	0,155	-0,215	-0,192

Количество столбцов в редуцированной корреляционной матрице определяет количество факторов, необходимых для определения всех корреляций, а нагрузки каждого фактора определяются строками факторной матрицы, затем определяется качество действующих факторов. В практических расчетах достаточно выбрать первые три-четыре действующих фактора, количество которых рассчитывается по формуле Терстоуна:

$$m = \frac{2n+1-\sqrt{8n+1}}{2}, \quad (\text{X.5.1})$$

где n - количество действующих факторов, а количество активных факторов (m) равно:

$$m = \frac{2,8+1-\sqrt{8 \cdot 8+1}}{2} \approx 4. \quad (\text{X.5.2})$$

После выполненных операций итоговая матрица восьми действующих факторов имеет вид таблицы X.5.4, где четыре теста практически характеризуются наибольшей нагрузкой (величиной) четвертого фактора (K_r). Следовательно, первая нагрузка – шероховатость поверхности откоса (K_r), вторая – начальная высота волны (h_H), третья – уклон откоса ($m = \text{ctg}\alpha$), четвертая – пологость волн (λ_H/h_H) (табл. X.5.4).

Таблица X.5.4

Ранжирование действующих факторов на высоту
вскатывания волн ($h_{\text{run up}}$) на откос

Последовательность нагрузок	Действующие факторы
1	Шероховатость и пористость откоса (K_r)
2	Начальная высота волны (h_H)
3	Уклон откоса ($m = \text{ctg}\alpha$)
4	Пологость волны (λ_H/h_H)
5	Обеспеченность волны (Π°)
6	Угол подхода волны к откосу (β°)
7	Скорость ветра (V_w)
8	Глубина воды на откосе (H)

Пример 2.

Многофакторное значение высоты трансформированной волны (h_i) в порядке убывания значения ранга записывается в виде:

$$h_i = f(h_H, H, m, \beta, h_H/\lambda_H, K_r, \Pi^{\circ}). \quad (\text{X.5.3})$$

В расчетах использованы натурные, теоретические и экспериментальные данные, проведенные по высоте трансформации волны на откосе исследователями из США, Франции, Англии, Японии, России, Грузии и других стран, результаты расчетов по этим данным приведены в таблице X.5.5.

Таблица X.5.5

**Зависимость трансформированной высоты волны
на откосе (h_i) от действующих факторов**

№	$m(X_3)$	$(h_H/\lambda_H)X_5$	$(H/\lambda_H)X_2$	$(Kr)X_6$	$(h_H) м, (X_1)$	$(\beta) X_4$	$(n\%) X_7$	$y(h_i)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	9,51	0,06	0,025	1,0 ^{*)}	0,5	0	1	0,6
2	9,51	0,36	0,05	1,0	0,5	10	2	0,65
3	9,51	0,07	0,05	1,0	0,5	20	5	0,74
4	9,51	0,045	0,075	1,0	1,0	30	10	1,04
5	9,51	0,08	0,075	1,0	1,0	40	20	1,02
6	9,51	0,054	0,1	1,0	1,0	50	30	0,85
7	9,51	0,1	0,1	1,0	1,5	60	40	0,82
8	6,30	0,045	0,075	1,0	1,5	70	50	0,72
9	6,30	0,054	0,1	1,0	1,5	80	1	1,53
10	3,07	0,036	0,05	1,0	2,0	90	2	1,55
11	3,07	0,15	0,075	1,0	2,0	0	5	2,01
12	3,07	0,054	0,1	1,0	2,0	20	10	1,52
13	8,14	0,038	0,075	1,0	2,5	20	20	2,40
14	8,14	0,038	0,1	1,0	2,5	30	30	1,78
15	8,14	0,054	0,05	1,0	2,5	40	40	1,63
16	6,30	0,06	0,075	1,0	3,0	50	50	1,57
17	6,30	0,07	0,1	1,0	3,0	60	1	3,19
18	6,30	0,1	0,05	1,0	3,0	70	2	3,88
19	4,31	0,03	0,075	1,0	0,5	80	5	4,91
20	4,31	0,03	0,1	1,0	0,5	90	10	3,22
21	4,31	0,05	0,05	1,0	0,5	0	20	4,30

*) При отсутствии данных фактора значение его коэффициента равно единице.

Высота волны на «глубокой» воде (h_H) изменялась в следующих пределах – $h_H = 0,5 \div 3,0$ м; уклон откоса $m = \text{ctg} \alpha = 0,9 \div 9,5$; крутизна волны – $h_H/\lambda_H = 0,028 \div 0,10$; коэффициент шероховатости и водопроницаемости откоса – $K_r = 0,7 \div 1,0$; обеспеченность высоты волны – $n\% = 1\% \div 50\%$; угол подхода волны к берегу – $\beta = 0^\circ \div 90^\circ$. После расчетов вариации трансформированной высоты волны (h_i) на откосе с учетом количества экспертов (T) получены данные для оценки возможных ошибок (табл. X.5.6).

Таблица X.5.6

**Вариационная таблица возможных ошибок при расчете
трансформированной высоты волны (h_i)**

№	$h_i, м$	T_i	$(h_i - \bar{h}_i)M$	$(h_i - \bar{h}_i)^2 M^2$	$T_i(h_i - \bar{h}_i)M$
1	0÷0,5	12	-1,53	2,34	30,42
2	0,5÷1,0	30	-1,03	1,06	3,80
3	1,0÷1,5	25	-0,53	0,28	7,0
4	1,5-2,0	23	-0,03	0,001	0,0023
5	2,0-2,5	22	0,47	0,22	4,44
6	2,5-3,0	8	0,97	0,94	7,52
7	3,0-3,5	9	1,47	2,16	19,44

Результаты возможных ошибок компонентов приведены в таблице X.5.7.

Таблица возможных ошибок

№	Формула компонента	Значение компонента
1	$\bar{h}_i = \frac{\sum_i^r h_i}{T}$	1,78
2	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_l^r T (h_i - \bar{h}_i)^2}{v}}$	1,006
3	$\sigma_{\bar{X}} = \pm \sigma / \sqrt{T}$	$\pm 0,084$
4	Критерий степени надежности $\bar{h}_i / \sigma_{\bar{X}}$	22,25

Т.о., значение критерия надежности $(\bar{h}_i / \sigma_{\bar{X}}) = 22,25 > 3$, свидетельствует о том, что его значение является надежным. На основании расчетов составляется таблица действующих факторов, ранжированных по степени их воздействия (табл. X.5.8).

Таблица X.5.8

Ранжирование действующих факторов трансформированной высоты волны (h_i)

Степень воздействия	Действующие факторы
1	2
1	Начальная высота волны – $X_1(h_n)$
2	Расчетная глубина воды – $X_2(H)$
3	Уклон откоса – $X_3(m)$
4	Угол подхода волны к берегу – $X_4(\beta)$
5	Пологость волны – $X_5(h_n / \lambda_n)$
6	Шероховатость откоса – $X_6(K_r)$
7	Обеспеченность волн – $X_7(m\%)$

Предлагаемое ранжирование факторов совпадает с априорной диаграммой экспертов (рис. X.4.1), что повышает достоверность расчетов.

X.6. МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Используя метод распознавания, можно объединить действующие факторы в однородные классы [Горелик А. Л., Скрипкин В.Л., 1977]. В волновой гидравлике возможно объединение одного или нескольких факторов в один класс (рис. X.6.1).

Для оценки факторов использован метод распознавания образов [Андреев И. О., 1959; Брайтман В. М., 1962].

Для расчета трансформации высоты волны (h_i) в зависимости от уклона откоса методом факторного анализа выбраны четыре фактора: X_1, X_2, X_3, X_4 ; затем $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \bar{X}_4$ – среднее арифметическое, $NN(\bar{X}_1), NN(\bar{X}_2), NN(\bar{X}_3), NN(\bar{X}_4)$ – среднеквадратичное значения дисперсии этих факторов.

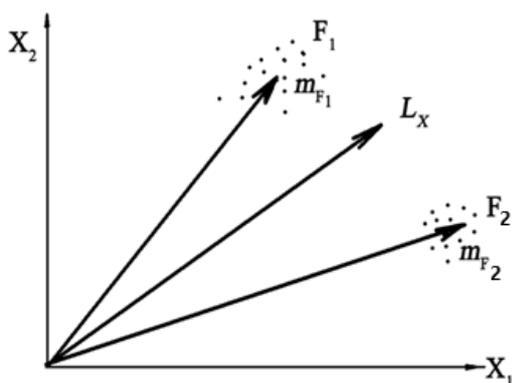


Рис. X.6.1. Геометрическая интерпретация многофакторных зависимостей методом распознавания образа

Используя метод распознавания образов, определена степень влияния отдельных факторов посредством весовых коэффициентов (W_i) [Джонсон Н., Лион Ф., 1980]:

$$W_i = \frac{1}{N_i^2 \left(\sum_{n=1}^n \frac{1}{N N_i^2} \right)}, \quad (X.6.1)$$

где N_i^2 – дисперсия.

Пример 1.

Пример распознавания образов при оценка влияния факторов, влияющих на трансформацию трансформированной высоты волны (h_i) на откосе

Количественная оценка влияние первых четырех факторов: высоты волны $X_1(h_n)$, расчетной глубины $X_2(H_i)$, крутизны откоса $X_3(m=ctg\alpha)$ и угла подхода волны к берегу $X_4(\beta)$ определена методом распознавания образов.

С помощью факторного анализа определенная выше ранжированная комбинация трансформированной высоты волны представлена в следующем виде:

$$h_i = f(X_1; X_2; X_3; X_4), \quad (X.6.2)$$

где $X_1=h_n$; $X_2=H_n$; $X_3=m=ctg\alpha$; $X_4=\beta$.

Для условий горных водохранилищ возможный диапазон трансформации высоты волны (h_i) на откосе можно разделить на два класса (табл. X.6.1).

Таблица X.6.1

Ранжирование величины трансформированной высоты волны (h_i) на откосе

I класс	$h=0,0\div 1,0$, м
II класс	$h=1,1\div 2,0$, м

Для каждого класса (F_i) выбрано по семь факторов (табл. X.6.2).

Таблица X.6.2

Выборка факторов для ранжирования (F_I ; F_{II}) классов

Класс	Вектор L_i	Фактор X_1	Фактор X_2	Фактор X_3	Фактор X_4	h_i
1	2	3	4	5	6	7
F_I	1	0,5	0,025	9,5	0	0,6
	2	1,0	0,075	2,36	10	0,8
	3	1,5	0,075	6,30	70	0,72
	4	1,0	0,050	3,08	60	0,75
	5	0,5	0,100	0,9	0	0,44
	6	1,5	0,025	6,31	50	0,97
	7	1,5	0,050	8,14	20	1,00
F_{II}	1	1,0	1,0	9,51	0	1,10
	2	1,5	0,1	6,30	10	1,53
	3	2,5	0,1	8,14	70	1,78
F_{II}	4	2,0	0,1	3,07	10	1,52
	5	2,0	0,05	3,07	90	1,55
	6	3,0	0,075	6,30	50	1,57
	7	2,5	0,1	8,14	30	1,78

Расчеты вероятностных элементов трансформированных высот волн приведены в таблице X.6.3.

Таблица X.6.3

Расчет трансформированных элементов высот волн (h_i)

Класс	Количество	h_i , м	\bar{X}_1	$\sigma(\bar{X}_1)$	$\sigma^2(\bar{X}_1)$	\bar{X}_2	$\sigma(\bar{X}_2)$	$\sigma^2(\bar{X}_2)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
F_I	7	0-1,0	1,07	0,23	0,038	0,05	0,40	0,19
F_{II}	7	1,1-2,0	2,07	0,30	0,08	0,21	0,51	0,30
Класс	Количество	h_i , м	\bar{X}_3	$\sigma(\bar{X}_3)$	$\sigma^2(\bar{X}_3)$	\bar{X}_4	$\sigma(\bar{X}_4)$	$\sigma^2(\bar{X}_4)$
10	11	12	13	14	15	16	17	18
F_I	7	0-1,0	5,22	0,51	0,30	30	0,41	0,15
F_{II}	7	1,1-2,0	6,36	0,42	0,17	45 30	0,29	0,26

Количественная оценка влияния факторов на высоту трансформированной волны с использованием значения весовых коэффициентов приведена в таблице X.6.4.

Таблица X.6.4

Значения весовых коэффициентов факторов, влияющих на высоту волны (h_n) по классам

W_i	Значения весовых коэффициентов	
	Класс I ($h_i < 1,0$ м)	Класс II ($2,0 > h_i > 1,0$ м)
W_{h_H}	0,50	0,55
W_H	0,22	0,19
W_m	0,19	0,15
W_β	0,09	0,11

Анализ весовых коэффициентов показал: ранжирование значений факторов сохраняется в обоих классах, при этом наиболее существенное влияние оказывает начальная высота волны (h_H), затем - глубина вода (H_H), уклон склона ($m=ctg$) и угол подхода волн к склону (β). Исследования показали, что значения длины волны (λ_i) и периода (τ_i) практически не изменяются при уклоне склона ($\alpha > 80^\circ$) $\lambda_i \cong \lambda_H$; $\tau_i \cong \tau_H$.

Пример 2.

Оценка факторов, влияющих на изменение верхней границы ($h_{run\ up} = a$) берегозащитных сооружений водохранилищ

Величина верхней границы (a) берегозащитных сооружений водохранилищ зависит от высоты наката волн ($h_{run\ up}$) на склон, для оценки ее значения используется параметрический метод распознавания образов [Мирицхулава Ц.Е., 1974]. Величина наката волн на откос ($h_{run\ up}$) зависит от четырех основных факторов:

$$h_{runup} = f\left(h_H, m, \frac{\lambda_H}{h_H}, K_r\right), \quad (X.6.3)$$

где h_H – высота волны на "глубокой воде", $m = ctg\alpha$ – уклон склона, λ_H – длина волны, K_r – коэффициент шероховатости откоса.

Значения наката волн на откос горных водохранилищ ($h_{run\ up}$) ранжируются по четырем классам: I класс – $h_{run\ up} = 0 \div 1,0$ м; II класс – $h_{run\ up} = 1,0 \div 2,0$ м; III класс – $h_{run\ up} = 2 \div 3,0$ м; IV класс – $h_{run\ up} > 3$ м.

В горных водохранилищах Грузии зафиксирована максимальная высота волны на «глубокой воде» $h_{max} = 4,0$ м, скорость ветра – $V = 20,0$ м/с; $m = 0,1 \div 20,0$; $\lambda_H/h_H = 7 \div 35,0$; $K_r = 0,3 \div 1,0$.

Для начальных элементов – $h_H = 1,0$ м, $m = 1,0$, $\lambda_H/h_H = 1,0$, $K_r = 1,0$, – приняты значения вероятности: $P_1 = 0,1387 \cdot 10^{-10}$, $P_2 = 0,1438 \cdot 10^{-10}$, $P_3 = 0,0982 \cdot 10^{-10}$, $P_4 = 0,0818 \cdot 10^{-10}$.

Т.к. значение (P_2) – максимальное, рассматриваемый объект относится к II-му классу. С помощью метода распознавания образов определена степень влияния отдельного фактора по весовым коэффициентам (W_i), значения которых для всех классов приведены в таблице X.6.5.

Таблица X.6.5

Значения весового коэффициента факторов (W_i), влияющих на высоту наката волн на откос ($h_{run\ up}$) по классам

Весовые коэффициенты (W_i)	Классы			
	I	II	III	IV
W_H	0,3800 2	0,0030 3	0,1350 2	0,0190 2
W_m	0,0010 4	0,0950 2	0,0010 3	0,0017 3
$W_{\lambda/h}$	0,0090 3	0,0020 4	0,0005 4	0,0003 4
W_{K_r}	0,6100 1	0,9000 1	0,8950 1	0,9796 1

Анализ значений весовых коэффициентов (W_i) показал, что наибольшее влияние на высоту наката волн на откос оказывает коэффициент шероховатости склона во всех классах, а в третьем и четвертом классах – глубина воды и пологость волны.

XI. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УЯЗВИМОСТИ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДОХРАНИЛИЩНЫХ СИСТЕМ

XI.1. АНАЛИЗ АВАРИЙ И КАТАСТРОФ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПЛОТИН

Водохранилищная система – водохранилище, плотина, водосброс – представляет собой комплекс важнейших элементов водного хозяйства, обеспечивающий эффективное использование водных ресурсов. Но для этого комплекса, наряду с его положительными эффектами, характерны катастрофические явления, приводящие к человеческим жертвам и потере сельскохозяйственных угодий, жилья и транспортной инфраструктуры.

Плотины на Земле впервые были построены в Древнем Египте более 3000 лет назад до нашей эры (табл. I.1). Еще во времена фараона Менеса для переброски р. Нил была построена плотина Кошиш длиной 415 м и высотой 17,5 м. 2800 годами раньше до н.э. к югу от Каира была построена плотина Сад-эль-Кафар высотой 13 м и длиной 121 м. 2300 лет назад до н.э. в 80 км от Каира было создано водохранилище Мерис объемом более 1 км³, которое Геродот назвал одним из чудес света. Позже плотины были созданы на Ближнем Востоке [Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2010 (на грузинском языке), Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., 2012]. В первые века нашей эры строительство плотин шло быстрыми темпами: в царстве Набата (территория Израиля) водохранилище было создано путем сооружения двух плотин высотой 14 м на р. Сиг. Плотины сохранились до наших дней.

Интенсификация создания плотин наблюдается с V века нашей эры, значительная часть которых была разрушена во время войн. В первом тысячелетии нашей эры на реке Фавренах была создана плотина высотой 40 м и длиной 120 м; эксплуатировалась 100 лет.

В Азии - Японии в 522-1600 годах были созданы плотины высотой более 15 м, а в последующие 200 лет – 540 плотин с гидроэлектростанциями, которые эксплуатируются и по сей день. В **Китае** в первые века нашей эры строительство велось в районе между реками Хуанхэ и Янцзы. Плотина длиной 100 м на р. Хуанхе создала крупное водохранилище Хунизеху и ряд более мелких водохранилищ.

Развитие строительства водохранилищ в **Европе** началось в XIV-XVI веках.

Большое количество плотин в **Америке** было построено в Мексике племенами ацтеков, инков и майя. Плотина Несауалькойотль длиной 16 км разделила озеро Тескоко пополам и создала водохранилище Мехико. Эти постройки не сохранились, так как часть их была разрушена испанскими конкистадорами в XV веке. Новый пик интенсификации строительства водохранилищной системы относится к VII веку. Вторая половина XX века характеризовалась динамичными темпами создания водохранилищ во всем Мире. Их количество удвоилось с 1950 года, а общий объем водохранилищ увеличился в 8 раз.

На современном этапе строительство плотин идет быстрыми темпами во всех странах Мира. В Мире насчитывается около 200 000 больших и малых плотин.

Анализируя данные Международной комиссии по авариям и катастрофам, было

установлено, что ежегодно повреждается до 3000 плотин [Иорданишвили И., Иорданишвили К., 2010 (на грузинском языке)].

Анализ причин **повреждений, аварий и катастроф** плотин проводился на основании каталогов, специальной литературы, периодических изданий, книг, информационных материалов и докладов, представленных на международных конгрессах.

Повреждение и разрушение – это состояние плотины, после которого она может нормально функционировать после ремонта, хотя нередко это приводит к человеческим жертвам. **Катастрофа** – плотина рушится и после этого уже не функционирует. Как правило, катастрофа сопровождается человеческими жертвам.

На основе анализа нескольких сотен аварий и повреждений плотин установлено, что 31% аварий произошли из-за их фильтрации, суффозии, агрессивности воды и кавитации; из-за перелива через плотину – 18%; от размыва, выщелачивания, эрозии, оползней, просадок, трещин и каверн – 17%; из-за ошибок, допущенных при проектировании и эксплуатации плотины – 15%; из-за сейсмических явлений, вызванных землетрясением, наполнением-опорожнением водохранилища – 9%; из-за паводков, ливневых дождей – 5%; из-за оттаивания и промерзания плотины, значительных колебаний температуры – 4%; из-за волновой нагрузки - 1%.

Повреждения плотин, аварии и катастрофы всегда происходили и происходят. На основе анализа факторов, вызывающих повреждения, аварии и катастрофы более 400 плотин Мира, выявлено, что наиболее уязвимым типом является **земляная плотина** (табл. XI.1.1).

Анализ катастроф земляных плотин Мира

После заполнения водохранилища паводковыми водами в земляных плотинах могут развиты такие деформации, которые вызывают их неустойчивость, нарушая целостность грунта плотины, вызывая ее разрушение. При проектировании земляных плотин необходимо ставить задачу сохранения качества грунта плотины. Решением такой задачи является сохранение профильного равновесия плотины. Эти процессы обычно сопровождаются суффозией грунтов тела плотины и фильтрационными явлениями. Трещины являются наиболее опасной формой разрушения земляных плотин. Суффозия сопровождается увеличением просачивания воды; провалы образуются в теле земляной плотины, на ее откосах и в днище. Наглядным примером катастрофы земляной плотины в Бразилии в XX веке, которая разрушилась всего за 20 минут (фото XI.1.1÷XI.1.4) [И. Иорданишвили, И. Иремашвили, Г. Натрошвили, К. Иорданишвили, М. Глунчадзе, 2019 (на грузинском языке)].

В 1975 году 200 000 человек погибли в результате прорыва и разрушения земляной плотины Рукхуа в Китае. Эта катастрофа считается величайшей в истории человечества.

Крупные повреждения, аварии и катастрофы плотин мира

Тип плотины	Количество плотин	Факторы, вызывающие аварии и повреждения плотин								Количество катастроф плотин	Количество человеческих жертв	Количество аварий плотин	Количество поврежденных плотин
		Землетрясение	Паводки, наводнения	Осадка, смыв, оползень	Перелив через гребень	Ошибки в конструкции и эксплуатации	Оттаивание плотины	Болновое воздействие	Суффозия, агрессивность воды				
Земляные	260	12	42	48	42	8	3	87	36	40	273000	94	122
Каменно-набросные	80	4	8	12	25	12	5		14	18	2300	31	27
Бетонные	48	3	1	14	1	11	3	-	13	11	3000	11	26
Всего	388	19	51	74	68	31	11	87	63	69	278300	136	175



Фото XI.1.1. Земляная плотина до катастрофы (Бразилия)



Фото XI.1.2. Земляная плотина через 5 минут после начала катастрофы (Бразилия)



Фото XI.1.3. Земляная плотина через 10 минут после начала катастрофы (Бразилия)



Фото XI.1.4. Земляная плотина через 15 минут после начала катастрофы (Бразилия)

Анализ аварий каменно-набросных плотин Мира

Основной причиной разрушения каменно-земляных плотин является прорыв плотины и неправильный учет геологических условий основания (рис. XI.1.1, табл. XI.1.1).

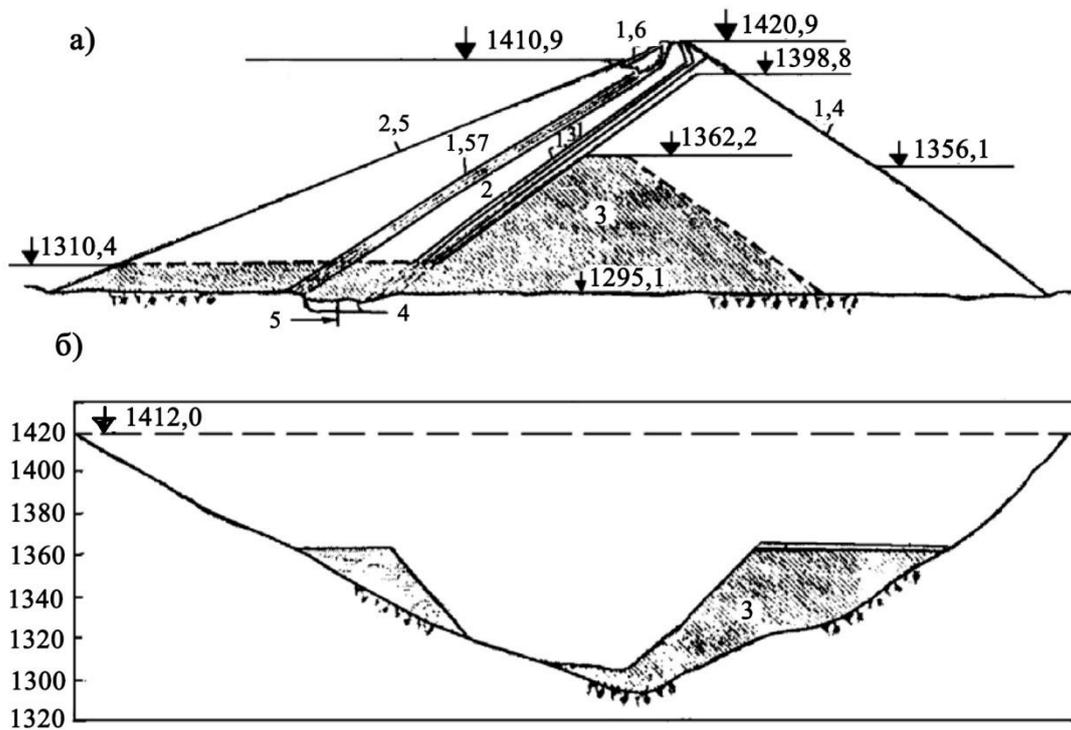


Рис. XI.1.1. Авария каменно-набросной плотины Хель-Холь при переливе воды через гребень
а) Поперечный профиль: 1 – насыпи; 2 – грунтовый экран; 3 – часть плотины, оставшаяся после прорыва плотины; 4 – цементная завеса; (б) Продольный профиль: оставшаяся часть плотины после паводка

80% прорывов каменно-набросных плотин происходит из-за перелива воды через гребень и фильтрации через тело плотины. На каменно-набросной плотине Орос в Бразилии 35-сантиметрового потока над гребнем было достаточно, чтобы она разрушилась.

Анализ аварий существующих бетонных плотин на земле

В результате разрушения бетонной плотины Сент-Френсиса 600 человек погибли (США) (1928 г.). Плотина разрушилась из-за находящегося в ее основании вымытого конгломерата и отложившихся в водохранилище закристаллизовавшихся сланцев (рис. XI.1.2, фото XI.1.5). Поток воды высотой 40,0 м затопил участок территории протяженностью 80 км. Водоохранилище полностью опустело за 1 час.

Бетонная плотина Мал-Пасс (Франция) рухнула в 1959 году. Причиной обрушения стало большое количество микротрещин в основании плотины. Погибло 42 человека (рис. XI.1.3).

В 1963 году, вызванная дождями и сползания откоса в водохранилище волна воды высотой 20,0 м перелилась через бетонную плотину Вайонт в Италии, в нижнем бьефе плотины погибло 2500 человек, плотина почти не пострадала.



Рис. XI.1.2. Катастрофа бетонной плотины Сент-Френсис, 1928 г. (США, Калифорния)

а)



б)



Фото XI.1.5. Катастрофа бетонной плотины Сент-Френсис, 1928 г. (США, Калифорния)

а) Вид на плотину до катастрофы; б) Вид оставшегося узкого участка в центральной части бетонной плотины.

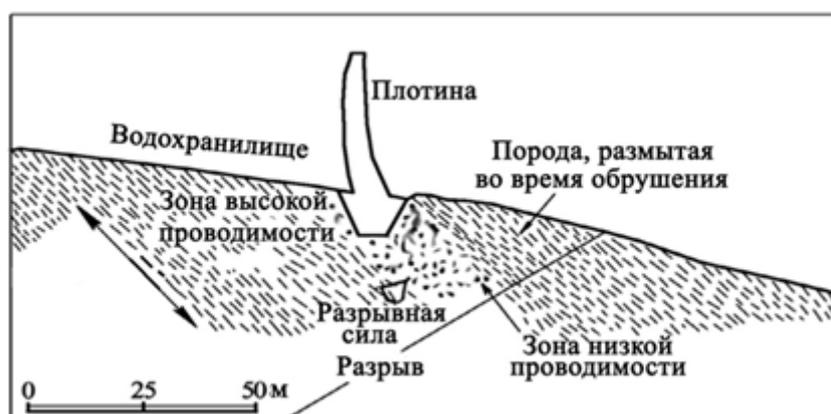


Рис. XI.1.3. Разрез бетонной плотины Маль-Пассе, 1959 год (Франция)

Анализ аварий и катастроф плотин в Грузии

В настоящее время на территории Грузии эксплуатируется 15 крупных земляных, 5 каменно-набросных и 6 бетонных плотин (табл. XI.1.2; табл. XI.1.3, табл. XI.1.4) [И. Иорданишвили, К. Иорданишвили, 2013 (на грузинском языке), Вартанов М., Иорданишвили И., Кечхошвили Э., Бераия Н., Шагирадзе М., 2020].

Таблица XI.1.2

Основные показатели земляных плотин Грузии

№	Название водохранилища	Район	Назначение	Конструкция плотины	Размеры плотины		Объем элементов плотины, м ³			Технология строительства	Источник питания водохранилища	Современное состояние водохранилища
					Высота, м	Длина, м	Общий	Антифильтрационные элементы	Призмы			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Архашенисхеви	Сагареджо	Орошение	Неоднородная, зуб, ядро и опорные призмы	35		1569197	668722	900475	Отсыпка в воду	Наливное	Не работает
2	Девисцкали	–,–	–,–		32	595	984242			–,–	–,–	Функционирует
3	Удабно	–,–	–,–	Однородная	10,8	229	30000			–,–	–,–	Функционирует
4	Чермисхеви	–,–	–,–	Неоднородная, зуб экран и опорные призмы	30,8	131	116850	20600	96250	–,–	–,–	Не функционирует
5	Лакбе	–,–	–,–	Неоднородная, зуб, ядро, опорные призмы, переходная зона, дренаж, банкет	75	585	5988000	1080000	4423000	Отсыпка в воду	–,–	Не функционирует
6	Телетцкали	Дедоплискар	–,–	Неоднородная, зуб, ядро, опорные призмы	41,3	260	378000	60000	318000	–,–	–,–	Не функционирует

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7	Кушисхеви	–,–	–,–	Однородная	18	719	657000			–,–	–,–	Функционирует
8	Кранчисхеви	–,–	–,–	–,–	14,5	406	214000			–,–	–,–	Не функционирует
9	Далисхта	–,–	–,–	Неоднородная, зуб, экран, опорные призмы	38	1750	580000			Отсыпка в воду	р. Иори	Не функционирует
10	Ваке	–,–	–,–	Неоднородная, зуб, экран, опорные призмы	36,7	250	407000	49290	357710	Отсыпка в воду	Наливное	Не функционирует
11	Сионское	Тианети	Ирригация, эл. энергия, водоснабжение	Неоднородная	84,4	780	6400000	628000	5772000	–,–	р. Иори	Функционирует
12	Красногорка	Сагареджо	Орошение	Однородная	15	415	318050			Отсыпка в воду	Наливное	Не функционирует
13	Зонкарское	Цхинвали	–,–	Неоднородная, зуб, ядро и опорные призмы	71	425,5	3059000	295000	2764000	Отсыпка в воду	р. Лиахви	Функционирует
14	Жинвальское	Душети	Эл. энергия, ирригация, питьевая вода	Земляная плотина с глиняным ядром	98	12000	6156300	4225000		–,–	р. Арагви	Функционирует

Таблица XI.1.3

Показатели каменно-набросных плотин Грузии

№	Название водохранилища	Район	Назначение	Конструкция плотины	Ширина плотины (по основанию), м	Высота плотины, м	Длина плотины, м	Общий объем плотины, м ³	Источник питания водохранилища	Современное состояние водохранилища
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Храмское (Цалкское)	Цалка	Эл.энергия, орошение	Наброска	5,0	32,0	113,0	9 000	р. Храми	Функционирует
2	Шаорское	Амбролаури	Эл.энергия	Наброска	8,8	14,2	1241,0	79 000	р. Дидичала, р. Ткибула	Функционирует
3	Гальское	Гали	Эл.энергия	Наброска	8,0	55,0	890,0	195 000	р. Эрисцкали, р. Ингури	Функционирует
4	Алгетское	Тетриццаро	Эл.энергия	Наброска	12,0	86,0	470,0	485 000	р. Алгети	Функционирует
5	Тбилисское	Тбилиси	Орошение	Две каменные, две бетонные	8,0 10,0	10,0 12,0	480,0 290,0	25 000 21 000	р. Иори, р.Жинвали	Каменно-набросные плотины расположены выше уровня грунтовых вод

Таблица XI.1.4

Показатели бетонных плотин Грузии

№	Название плотины	Высота плотины, м	Длина гребня плотины, км	Ширина по гребню плотины, м	Тип плотины	Настоящее состояние водохранилищ
1	2	3	4	5	6	7
1	Джварская (Ингурская)	271,5	758,0	10,0	Арочная, из бетона	Функционирует
2	Ладжанурская	70,0	127,0	2,5	Арочная, из бетона	Функционирует
3	Гуматская	32,0	211,0	3,0	Бетонная, гравитационная	Заилено
4	ЗаГЭС	24,0	68,0		Бетонная	Функционирует
5	Варцихская	21,02 (ж-б) 11,0 (з)	447,0	10,0	Железобетонная и земляная	Заилено
6	Тбилисская	9,0; 15,0 10,0; 12,0	192,0; 290,0; 480,0; 290,0	2,0 – 2,5	Две бетонные, две земляные	Функционирует

Ряд плотин в Грузии подвержены разного рода повреждениям, одной из причин этого является перелив воды через гребень плотины. Методика прогнозирования переливов воды через гребень высоких плотин была разработана академиком Г. Гавардашвили [Гавардашвили Г.В., 2010].

Примером единственной катастрофы земляной плотины в Грузии является плотина у поселка Цкнети (14 мая 1980 г.), когда рухнула земляная плотина высотой 12,0 м., погибли семь человек (фото XI.1.6, рис. XI.1.4). Причиной катастрофы стало ослабление физико-механических свойств грунта плотины после 30 лет эксплуатации и размыв нижнего бьефа плотины сильными дождями. Эти факторы привели к сокращению длины фильтрации, увеличению скорости фильтрации и резкому подъему уровня воды (на 40÷50 см) в течении одного часа. Из-за гидродинамического воздействия нижний откос плотины начал оседать, появилась трещина. Струя фильтрующейся воды вызвала снижение устойчивости откоса. Трещина, возникшая в вершине плотины, распространилась по всей длине тела плотины, откуда вода расширила и углубила трещину, в результате чего сползла левая, а затем и правая часть плотины вниз. Значение коэффициента водонасыщенности составило 0,9-1,0, за счет чего была снижена характеристика устойчивости тела плотины.

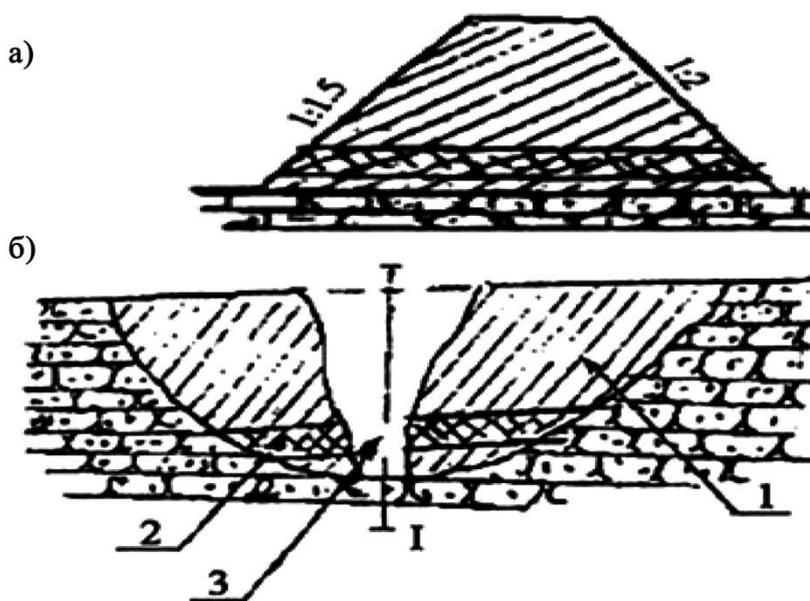


Рис. XI.1.4. Прорыв земляной плотины у поселка Цкнети (1980 г.)

а) Поперечный профиль плотины до прорыва;

б) Продольный разрез оставшейся части после прорыва плотины;

1 - тело земляной плотины; 2 - слой глины; 3 - прорванная часть плотины.

Из-за перелива воды через гребень земляной плотины Далис-мта плотина вышла из строя и водохранилище до сих пор не функционирует.

В апреле 2010 г. в результате интенсивных дождей произошло резкое повышение уровня воды в Черемском водохранилище, что сопровождалось подмывом берегов и основания бетонных плит в головной части водосброса, разрушением водосброса и моста (фото XI.1.7).

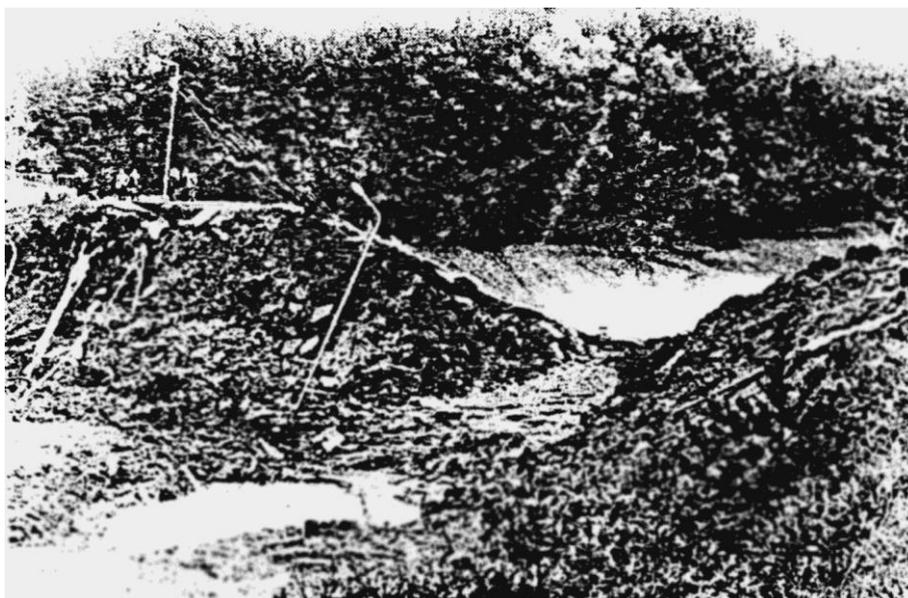


Фото XI.1.6. Катастрофа Цкнетской земляной плотины (1980г.)



Фото XI.1.7. Авария на водосбросе Черемского водохранилища (2020г.)

Из-за возможного прорыва воды создалась опасная ситуация для г. Гурджаани. Профилактические мероприятия проводились оперативно. Промытое русло катастрофического водосброса было укреплено мешками с песком, заиленный водовыпуск (иригационная труба) очищена направленным взрывом. В результате принятых мер уровень воды в водохранилище был снижен до минимума. В настоящее время водохранилище не функционирует.

В ночь на 13 июня 2015 года в Тбилиси на участке Цкнети-Бетания произошла трагедия, причиной которой стал спуск горного массива с большой высоты, вызванный дождями. Обрушившаяся грязевая масса влилась в реку Вере, заблокировав ее русло, вызвав

наводнение. Вода прорвала созданную плотину. Это привело к спаду воды в окрестностях долины р. Вере. Оползень протяженностью 4 км и шириной 600 м пересек две дороги: был перекрыт 400-метровый участок автодороги Цкнети-Самадло, парализован подъезд к селу Ахалдаба. Река Вере снесла селевую массу от университетского городка к площади Героев г. Тбилиси. Поток не смог пройти по туннелям и водная волна залила долину реки. Долина р. Вере была полностью затоплена. Вода прошла по улице Сванидзе и достигла площади Героев (фото XI.1.8). За короткий промежуток времени расход воды в этом районе составил $500 \text{ м}^3/\text{с}$ (для сравнения, расход реки Кура у Авчальской ГЭС $400 \text{ м}^3/\text{с}$), высота волны 7-8 метров. В результате стихийного бедствия погибли 19 человек, 4 человека пропали без вести, около 400 человек остались без крова, ущерб достиг 100 миллионов лари [И. Иорданишвили, И. Иремашвили, Г. Натрошвили, К. Иорданишвили, М. Глунчадзе, 2019 (на грузинском языке)]. К счастью, подобных катастроф на каменно-набросных и бетонных плотинах в Грузии не было.



Фото XI.1.8. Бедствие в долине р. Вере (2015г.)

XI.2. ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЛОТИН

Безопасность земляных, каменно-набросных и бетонных плотин от аварий, повреждений и катастроф (инцидентов) – сложная задача. Одним из основоположников этих исследований был выдающийся грузинский ученый, академик Ц.Е. Мирцхулава, который отмечал, что «даже приблизительные оценки, примерно определяющие продолжительность существования техногенных систем, могут иметь большую ценность» [Мирцхулава Ц. Е., 1989].

Количественная оценка безопасности плотин проводится статистическими или вероятностными методами. На основании статистических данных о продолжительности эксплуатации плотин устанавливается средний период, в течение которого происходит один инцидент:

$$t_i = \sum_i^m t_i / n_{ин.}, \quad (XI.2.1)$$

где t_i – продолжительность эксплуатации плотины рассматриваемого типа (количество лет эксплуатации), $n_{ин.}$ – общее количество инцидентов за рассматриваемый период, m – общее количество плотин рассматриваемого типа.

Затем определяется вероятностный показатель безопасности плотин, отражающий проявление частных причин, приведших к инциденту. На основании информации о безопасности плотин определяется количество их безопасной эксплуатации каждые 100 лет:

$$n_{100} = 100n_c / n_{пер.}, \quad (XI.2.2)$$

где n_c и $n_{пер.}$, соответственно, количество инцидентов и анализируемый период.

С помощью статистических показателей определяются следующие показатели: уровень безопасности эксплуатации плотины; все факторы и причины, приводящие к возникновению инцидентных ситуаций; оцениваются уровни качества и безопасности плотин.

На основании статистической информации о факторах, способствующих инцидентам различных типов плотин – земляных, каменно-набросных, бетонных – (табл. XI.1.2), рассчитывается средний срок их эксплуатации (годы эксплуатации) ($n_{повр.}$, $n_{ав.}$, $n_{кат.}$), который приходится на один инцидент (повреждение, авария, катастрофа) [И. Иорданишвили, И. Иремашвили, Г. Натрошвили, К. Иорданишвили, М. Глунчадзе, 2019 (на грузинском языке)].

а) Для земляных плотин:

$$t_{повр.з.} = \frac{\sum_i^{m_3} t_{i,з.}}{n_{повр.з.}}, \quad t_{ав.з.} = \frac{\sum_i^{m_3} t_{i,з.}}{n_{ав.з.}}, \quad t_{кат.з.} = \frac{\sum_i^{m_3} t_{i,з.}}{n_{кат.з.}} \quad (XI.2.3)$$

где $t_{i,з.}$ – продолжительность эксплуатации земляных плотин (количество лет эксплуатации) в рассматриваемый период (например, 100 лет); $n_{повр.з.}$, $n_{ав.з.}$, $n_{кат.з.}$ – общее количество инцидентов (повреждений, аварий, катастроф) за рассматриваемый период (100 лет); m_3 – количество земляных плотин. Тогда средняя продолжительность эксплуатации земляных плотин, приходящихся на один инцидент (более 100 лет), составит:

$$n_{\text{повр.з.}} = \frac{327}{78} = 4,19, \quad n_{\text{ав.з.}} = \frac{542}{44} = 12,18, \quad n_{\text{кат.з.}} = \frac{187}{25} = 7,48.$$

б) Для каменно-набросных плотин:

$$t_{\text{повр.к.}} = \frac{\sum_i^{m_k} t_{ik}}{n_{\text{повр.к.}}}; \quad t_{\text{ав.к.}} = \frac{\sum_i^{m_k} t_{ik}}{n_{\text{ав.к.}}}; \quad t_{\text{кат.к.}} = \frac{\sum_i^{m_k} t_{ik}}{n_{\text{кат.к.}}} \quad (\text{XI.2.4})$$

Средняя эксплуатация каменно-набросных плотин, приходящихся на один инцидент (за период в 100 лет), составит:

$$t_{\text{повр.к.}} = \frac{359}{18} = 19,9; \quad t_{\text{ав.к.}} = \frac{228}{21} = 10,89; \quad t_{\text{кат.к.}} = \frac{110}{9} = 12,2.$$

г) Для бетонных плотин – арочно-гравитационные (АГ), арочные (А), бутобетонные (ББ), контрфорсные (КФ) и ряжевые (Р) типы рассматриваются вместе с бетонными (Б) плотинами:

$$t_{\text{повр.б.}} = \frac{\sum_i^{m_b} t_{ib}}{n_{\text{повр.б.}}}; \quad t_{\text{ав.б.}} = \frac{\sum_i^{m_b} t_{ib}}{n_{\text{ав.б.}}}; \quad t_{\text{кат.б.}} = \frac{\sum_i^{m_b} t_{ib}}{n_{\text{кат.б.}}} \quad (\text{XI.2.5})$$

Тогда, средняя продолжительность происшествий бетонных плотин, приходящихся на одно происшествие (за период в 100 лет), составит:

$$t_{\text{повр.б.}} = \frac{195}{16} = 12,19; \quad t_{\text{ав.б.}} = \frac{52}{8} = 6,5; \quad t_{\text{кат.б.}} = \frac{84}{6} = 14,0.$$

Средняя продолжительность инцидентов плотин, приходящих на один инцидент (за 100 лет) приведена в таблице XI.2.1.

Таблица XI.2.1

Средняя продолжительность инцидентов на плотинах

Земляные плотины		Каменно-набросные плотины		Бетонные плотины	
t пов.з. *)	4,19	t пов.к.	19,9	t пов.б.	12,19
t ав.з. *)	12,18	t пов.к.	10,86	t пов.б.	6,5
t кат.з. *)	7,48	t пов.к.	12,2	t пов.б.	14
*) В расчетах не учитывались аварии тех плотин, годы аварии которых не указаны в соответствующем банке данных.					

Таким образом, средняя продолжительность инцидентов, возникающих при одной катастрофе, наибольшая для **бетонных плотин**, то есть **бетонные плотины являются наиболее надежными**.

XI.3. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПЛОТИН

На основе анализа материалов аварий установлена основная причина инцидентов – перелив воды через плотину [Г. Гавардашвили, Э. Кухалашвили, Т. Супаташвили, И. Ирешашвили, К. Бзиава, Г. Натрошвили, И. Купарашвили, 2022 (на грузинском языке), Gavardashvili G., 2010; Gavardashvili G., 2013; Гавардашвили Г.В., 2010; Gavardashvili G.,

Kukhalashvili E., Supatashvili T., Qufarashvili I., Bziava K., Natroshvili G. 2018; Gavardashvili G., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Natroshvili G., Qufarashvili I., 2019]. В терминологии теории надежности данное событие (авария) является случайным явлением, поэтому оно может быть определено статистическими или вероятностными методами, в частности, вероятностным методом определения перелива воды через плотину или высоты наката волн на откосы водохранилища [Г. Бердзенашвили, Х. Иремашвили, 2016 (на грузинском языке)].

1. Расчет надежности отметки гребня плотины

Оценка отметки гребня плотины и верхней границы берегов горных водохранилищ определяется по зависимости [Иорданишвили И.К., 1987]:

$$h_{вр} = V_{run\ up, 1\%}^{волн.} \cdot a, \text{ м} \quad (XI.3.1)$$

где V_{max} – отметка самого высокого горизонта воды в водохранилище, м; $h_{run\ up, 1\%}$ – высота 1%-ой обеспеченности наката волны на откос плотины, м; $h_{нар}^{волн.}$ – высота нагонной волны, м; $a = 0,5$ м – запас высоты берегозащиты.

В отдельных случаях возможен перелив через плотину дискретными волнами. В этом случае высота наката волн на откос плотины рассчитывается по двум независимым волновым факторам – плотности вероятности высоты и длины волны на "глубокой воде".

Если учесть, что величина волнового нагона в условиях горных водохранилищ $h_{нар}^{волн.} \leq 0,5h_{run\ up, 1\%}$, тогда в экстремальном случае отметка верхней границы плотины равна:

$$h_{в.гр.} = K + 1,5 \cdot h_{run\ up, 1\%}, \quad (XI.3.2)$$

где $K = V_{max} + 0,5$ м.

Крутизна волн на горных водохранилищах равна $h_H/\lambda_H = \frac{1}{10} \div \frac{1}{20}$, уклон верхового откоса плотины $m = 3,0 \div 0,9$, значение $h_{run\ up, 1\%}$ равно:

$$h_{run\ up, 1\%} = h_{H1\%} \cdot K_i, \quad (XI.3.3)$$

где значение плотности вероятности ($h_{run\ up, 1\%}$) функционально зависит от высоты волны, а распределение высот волн горных водохранилищ в прибрежной зоне записывается в виде:

$$F(h_i/\bar{h}) = \exp[0,65(h_H/\bar{h})^4], \quad (XI.3.4)$$

где \bar{h} – среднее значение высоты волны, распределение которой представлено в функции одной случайной величины – высоты волны на «глубокой воде», все остальные величины – постоянны.

После ряда математических преобразований значение плотности вероятности высота накатывания волн на откос записывается в виде:

$$f(h_{run\ up, 1\%}) = 2,6 \left(\frac{h_{run\ up, 1\%}}{\bar{h} \cdot K^{-3}} \right) \exp \left[0,65 \left(\frac{h_{run\ up}}{\bar{h}} \right)^4 \right], \quad (XI.3.5)$$

где $K = f(m) \cdot K_{шер} \cdot K_{прон} \cdot f(h_H/\lambda_H)$; $K_{шер}$, $K_{прон}$ – коэффициенты шероховатости и водопроницаемости откосов плотины.

Численная реализация функции (XI.3.5) представлена на рисунке XI.3.1, где $m = 3,0$, $h_{H,1\%} = 0,5 \div 2,0$ м, $h_H/\lambda_H = 0,1$ [Иорданишвили И. К., 2000].

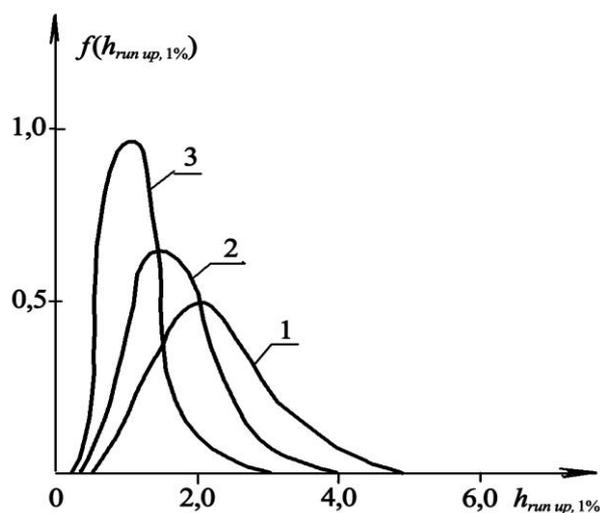


Рис. XI.3.1. Плотность вероятности функции $f(h_{run\ up, 1\%})$
 1 – $h_{run\ up, 1\%} = 0,5$ м, 2 – $h_{run\ up, 1\%} = 1,0$ м, 3 – $h_{run\ up, 1\%} = 2,0$ м

Тогда вероятность того, что вода не перельет через гребень плотины, равна:

$$P = \int_0^{2P} f(h_{run\ up, 1\%}) dh_{run\ up, 1\%} \quad (XI.3.7)$$

С увеличением случайной величины $f(h_{run\ up, 1\%})$ увеличиваются и значения вероятности P , что влечет необходимость прогнозирования возникновения аварий.

На основании расчетов составлена классификация берегозащитных сооружений с учетом периода эксплуатации (t) и вероятности (P) (табл. XI.3.1).

Таблица XI.3.1

Классификация берегозащитных сооружений плотин

Берегозащитные сооружения первого класса	Берегозащитные сооружения второго класса	Берегозащитные сооружения третьего класса
$P = 0,99$	$P = 0,85$	$P = 0,75$
$t = 1$ год	$t = 1$ год	$t = 1$ год

Приведенные расчеты надежности берегозащиты правомерны до отметки максимального наката волн на откос; в случае обрушения волны – расчет ведется с учетом максимальной силы удара волны об откос; расчет надежности толщины берегозащиты производится с учетом предельного значения толщины берегозащиты.

2. Расчет достоверности толщины берегозащиты

Интенсивность изнашивания покрытия, зависящая от износа, выражена дифференциальным уравнением [Мирцхулава Ц.Е., 1974]:

$$\frac{dH}{dt} = \alpha H, \quad (XI.3.8)$$

где H – толщина берегозащиты, t – период эксплуатации (год), α – постоянная износа, значение которой определяется на основании наблюдений с учетом типа и качества берегозащиты. Например, за время $t = 45$ лет эксплуатации берегозащиты начальная толщина $H_0 = 50$ см, 50% толщины железобетонных плит уменьшилась до $H_0 = 40$ см. Тогда

(если учесть, что ремонт необходим при уменьшении толщины берегозащиты на 8 мм) формулу (XI.3.8) можно записать в виде:

$$H = H_0 \ell^{-at} \text{ или } 40 = 50 \ell^{-a \cdot 45}, \quad (\text{XI.3.9})$$

где ℓ – число Непера.

Т.о., из уравнения (XI.3.9) следует, что через 45 лет эксплуатации $a = 0,00456$, время, необходимое для достижения предельной толщины берегозащиты, составляет $t = \frac{1}{a} \ln \frac{50}{49,2} = 4,34$ лет.

XI.4. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕРИОДА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Показателями риска аварий и катастроф водохранилищных систем являются: геоморфология чаши водохранилища; источник заполнения водохранилища водой; гипсометрические, рельефные и сейсмологические показатели; строительный материал плотины; атмосферные осадки. Нормализация этих данных проведена с использованием линейного метода преобразований, в результате чего было определено ранжирование прогностических значений аварий водохранилищных систем Грузии (табл. XI.4.1) [Вартанов М., Иорданишвили И., Кечхошвили И., Бераия Н., Шагирадзе М., 2020; Нормализация... (статистика)]:

- морфология чаши водохранилища и источник наполнения водой – не влияет (d_1);
- гипсометрия и рельеф участка водохранилища – оказывают незначительное влияние (d_2);
- сейсмология района водохранилища – влияет слабо (d_3);
- строительный материал плотины – влияет незначительно (d_4);
- атмосферные осадки – влияют сильно (d_5);
- суммарное влияние факторов (D) – рассчитывается по формуле:

$$D = 0,2(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5)$$

Мини-максимальным методом рассчитаны нормализованные значения характеристик природных условий водохранилищных систем Грузии (X_{norm}) [Нормализация... (статистика)] (табл. XI.4.1):

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{min} - X_{max}} \cdot 0,9 + 0,1 \quad (\text{XI.4.1})$$

Таблица XI.4.1

Нормализованные показатели ($X_{\text{норм}}$) действующих водохранилищ Грузии

№	Название водохранилища	Геоморфологический тип чаши водохранилища	Источник заполнения водохранилища	Гипсометрия водохранилища		Рельеф	Сейсмология района в баллах	Строительный материал плотины	Осадки		Глубина водохранилища, м	Полный объем водохранилища, млн м ³	$X_{\text{норм}}$	
				d_1	d_2				d_3	d_4				Средние в год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	Ингурское (Джварское)	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,66$		Пред-горное	Гористый	$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 0,1$ 6	$d_5 = 1,0$		230,0	109,0	0,52
		Долин-ный	р. Ингури	1534	150÷200									
2	Жинваль-ское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,78$		Горное	—,—	$d_3 = 1,0$ 9	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,82$		98,0	510,0	0,90
		—,—	р. Арагви	1082	150÷200									
3	Алгетское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,66$		Пред-горное	—,—	$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 0,4$ к н	$d_5 = 0,52$		72,9	63,0	0,46
		—,—	р. Алгети	668	100÷150									
4	Сионское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,78$		Горное	—,—	$d_3 = 1,0$ 9	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,52$		68,6	325,0	0,80
		—,—	р. Иори	825	100÷150									
5	Ладжанур-ское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,66$		Пред-горное	—,—	$d_3 = 1,0$ —,—	$d_4 = 0,1$ 6	$d_5 = 0,7$		67,8	24,6	0,52
		—,—	р. Ладжанури	1283	100÷150									
6	Зонкарское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 1,0$		Высоко-горное	—,—	$d_3 = 1,0$ —,—	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,82$		62,0	40,3	0,95
		—,—	р. Малая Лиахви	948	150÷200									
7	Гальское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,1$		Равнин-ное	Выпрям-ленный	$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 0,4$ к н	$d_5 = 0,79$		52,0	145	0,10
			Канал	1646	100÷150									
8	Тбилисское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,44$		Пред-горное	—,—	$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 0,4$ —,—	$d_5 = 0,87$		45,0	308	0,27
		—,—	—,—	596	200÷250									
9	Нареквав-ское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,78$		Горное	Гористый	$d_3 = 0,55$ —,—	$d_4 = 0,1$ 3	$d_5 = 0,82$		40,3	6,8	0,80
		—,—	р. Нареквави	1052	150÷200									
10	Ткибуль-ское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,66$		Пред-горное	—,—	$d_3 = 1,0$ 9	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,58$		32,0	84	0,77
		—,—	р. Ткибула	1648	75÷100									
11	Гуматское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,44$		Равнин-ное	—,—	$d_3 = 1,0$ 9	$d_4 = 0,4$ 6	$d_5 = 0,79$		30,0	39	0,55
		—,—	р. Риони	1592	100÷150									
12	Храмское (Цалкское)	$d_1 = 5,55$		$d_2 = 0,46$		Высоко-горное	Выпрям-ленный	$d_3 = 1,0$ —,—	$d_4 = 1,0$ к н	$d_5 = 0,40$		25,0	312	0,32
		Котло-ван	р. Храми	632	30÷175									
13	ЗаГЭС	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,44$		Пред-горное	—,—	$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 6	$d_5 = 0,43$		23,0	12,0	0,53
		Долин-ный	р. Кура	589	100÷150									

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	Гавцкаро	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,44$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,52$		22,4	3,36	0,36
		Котло- ван	Трубопровод	–,,–	–,,–			691	100÷150			
15	Лапианское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,55$		$d_3 = 1,0$ 9	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,73$		20,0	3,6	0,57
		–,,–	Канал	Горное	–,,–			875	150÷200			
16	Кухское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,33$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,79$		19,4	1,9	0,59
		Долин- ный	р. Кумис цкали	Равнин- ное	Горнистый			1608	100÷150			
17	Кушис- хевское	$d_1 = 1,0$		$d_2 = 0,55$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,52$		18,4	4,0	0,41
		–,,–	р. Кушис хеви	Пред- горное	–,,–			682	100÷150			
18	Пантиан- ское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,55$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,1$		15,0	5,36	0,27
		Котло- ван	Канал	Высоко- горное	Выпрям- ленный			658	30÷75			
19	Шаорское	$d_1 = 0,55$		$d_2 = 0,55$		$d_3 = 1,0$ 9	$d_4 = 0,4$ к н	$d_5 = 0,91$		12,3	90	0,54
		Котло- ван	р. Шаори	Горное	–,,–			1203	150÷200			
20	Дманисское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,55$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,1$		11,5	11	0,27
		–,,–	р. Дманиси	Высоко- горное	–,,–			649	30÷75			
21	Надарба- зевское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,55$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,1$		11,0	8,2	0,27
		–,,–	Насосное оборудование	Горное	–,,–			749	30÷75			
22	Цхенис- цкальское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,44$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,1$		10,5	1,5	0,22
		–,,–	Канал	Пред- горное	–,,–			692	30÷75			
23	Чальское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,44$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,73$		10,0	1,4	0,43
		–,,–	–,,–	–,,–	–,,–			658	150÷200			
24	Октябрьское	$d_1 = 0,55$		$d_2 = 0,33$		$d_3 = 0,55$ 9	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,73$		8,5	1,7	0,48
		–,,–	р. Пшавис хеви	Равнин- ное	–,,–			651	150÷200			
25	Марабдин- ское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,33$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,61$		8,0	1,2	0,35
		–,,–	Насосное оборудование	Пред- горное	–,,–			492	150÷200			
26	Варцихское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,33$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,61$		8,0	14,6	0,34
		–,,–	р. Риони	Равнин- ное	–,,–			987	100÷150			
27	Мтисдири- йское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,66$		$d_3 = 0,55$ 8	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,1$		7,2	3,3	0,32
		–,,–	Канал	Высоко- горное	–,,–			670	30÷75			
28	Джандар- ское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,33$		$d_3 = 0,1$ 7	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,64$		7,0	52	0,25
		–,,–	–,,–	Пред- горное	–,,–			483	150÷200			
29	Зресское	$d_1 = 0,1$		$d_2 = 0,55$		$d_3 = 0,55$ 9	$d_4 = 1,0$ 3	$d_5 = 0,1$		3,8	2,0	0,27
		–,,–	–,,–	Высоко- горное	–,,–			648	30÷75			

*) б – бетонные, к н – каменно-набросные, з – земляные плотины.

Анализ показал, что наиболее чувствительными являются Зонкарская и Жинвальская системы водохранилищ, где значения (X_{norm}) максимальны, а наименьшей чувствительностью обладает Гальское водохранилище ($X_{\text{norm}}=0,1$). Из приведенного материала видно, что водохранилища характеризуются низкой чувствительностью, а наиболее опасной причиной, способной вызвать аварию и катастрофу - являются ливневые дожди. Следует отметить, что нормализация данных методом линейного преобразования является априорным (качественным) методом.

Для определения **экологической надежности** функционирования водохранилищ и оценки степени уязвимости гидротехнических сооружений использованы положения, разработанные академиком Мирцхулава Ц.Е. [Мирцхулава Ц.Е., 1974]. Для повышения надежности водохранилищ научно обоснованная методика основана на анализе отказов этих сооружений. Отказом водохранилищ в данном случае считается такое событие, в результате которого нарушается его работоспособность. Проведенные исследования показали, что снижение функциональной способности водохранилища зависит от действия доминирующего фактора – заиливание чаши водохранилища.

С целью определения надежности безотказной работы водохранилища был составлен расчет, основанный на надежности водохранилища (P), при котором чашу водохранилища нужно очищать хотя бы 9 раз за 10 лет [Jordanishvili I., Jordanishvili K., Iremashvili I., 2009]:

$$P = 1 - P_K = 1 - \frac{e^{-a}}{K} a^K, \quad (\text{XI.4.2})$$

где $a = 9$ – параметр распределения; $K=10$ – случайная величина, распределение дисперсии, которой соответствует закону Пуассона; ℓ - число Непера. Тогда в соответствии с (XI.4.2) на водохранилище не потребуется проводить очистные работы более 9 раз за 10 лет при вероятности – $P = 1 - P_K = 1,0 - 0,12 = 0,88$.

Т.о., для надежного функционирования водохранилища значение его надежности должно быть достаточно высоким.

Для продления срока эксплуатации водохранилища необходимо:

- 1) регулярная механическая очистка и гидропромывка чаши;
- 2) восстановление и создание лесных массивов в бассейне водохранилища;
- 3) стабилизация эрозионных процессов в руслах рек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей монографии представлены результаты проанализированных существующих и новых исследований, включающих особенности эколого-эволюционных процессов на горных и предгорных водохранилищах Грузии.

В первых монографиях авторов – «Динамика внутриводоемных процессов горных водохранилищ Грузии», 2004 г. (на русском языке) и «Горные водохранилища Грузии и их влияние на окружающую среду», 2000 г. (на грузинском языке), приведена методика определения динамики переработки берегов, волновых и седиментационных процессов горных водохранилищ. Прошло не так уж много времени, но динамика различных процессов, происходящих в горных водохранилищах, претерпела значительные изменения. Используя собранный новый материал, отдельные вопросы существенно развиты и пересмотрены.

Создание данной монографии связано со строительством в Грузии новых горных водохранилищ и развившимися в последние годы крупномасштабными природными катаклизмами, такими как наводнения, оползни, размыв береговых склонов, заиление и загрязнение водохранилищ, оползни и возможный прорыв плотины. Описаны и проанализированы водохранилища, созданные с древних времен и их основные показатели, приведена динамика количества и общего объема воды в мировых водохранилищах. Выделено преимущество горных и предгорных водохранилищ по сравнению с равнинными. Отмечается, что Грузия относится к тем странам, которая может сама обеспечить энергетические и ирригационные нужды гидроресурсами, что является основной задачей проектировщиков гидротехнических узлов.

Наиболее рациональной схемой получения электроэнергии в горных районах является устройство в верховьях основной реки и ее притоков высоконапорных гидросооружений, а в нижнем течении реки – оросительных. Как правило, истоки горных рек располагаются в глубоких и крутых долинах. Поэтому здесь целесообразно строить высокие плотины, а в участках нижнего бьефа, отличающиеся небольшим уклоном, использовать для орошения. На территории Грузии целесообразно строительство глубоководных водохранилищ, отличающихся затоплением небольшой площади территории и незначительными экологическими проблемами.

Для изучения поднятых вопросов возникла необходимость охарактеризовать фонд водохранилищ, построенных в Мире и на территории Грузии, проанализировать известные исследования осадконакопления на дне и абразионных процессов на берегах.

На основе изучения научной литературы Грузии, данных, полученных от проектных и научных организаций, сравнены проектные и современные профили семи чаш крупных водохранилищ (Сионское, Тбилисское, Жинвальское, Храмское, Шаорское, Ладжанурское и Ткибулское). На основе полевых работ были составлены современные профили дна и берегов этих водохранилищ и нанесены на расчетные профили. Определены масштабы и динамика процессов осадконакопления и береговой эрозии перечисленных выше

водохранилищ. Составлены их многофакторные расчетно-прогностические зависимости с учетом периода, физико-механических свойств берегов, ветро-волнового, приливо-отливного режима и других факторов.

Рассматриваются оперативные меры против развития седиментационных процессов на дне горных водохранилищ. Указано, что наиболее распространенным способом очистки дна водохранилищ является устройство промывочных галерей на дне. Отмечается, что эффективная гидропромывка донных отложений на дне водохранилищ Грузии еще не реализована ни в одном водохранилище.

Разработаны новые конструкции, предохраняющие от размыва абразивного берега горных водохранилищ в виде «Модифицированного Гексаблока» и «Модифицированного Тетраблока», отличающиеся высокой волногасящей способностью и взаимозацепляемостью, уменьшающей высоту наката волн на откос. Рассчитана универсальная зависимость для определения оптимальной массы этих массивов.

Установлены принципы назначения береговых и водоохраных зон горных водохранилищ. Приводится расчет размеров водозащитной береговой линии и водоохранной зоны водохранилищ, величина общей ширины которых зависит от крутизны склона, типа леса, экспозиции склона и направления вспашки. Приведен пример определения размеров береговой линии и водоохранной зоны Сионского водохранилища. Отмечается, что размеры водоохраных зон на водохранилищах Грузии не соблюдаются.

Рассчитано время опорожнения (или наполнения) горных водохранилищ при постоянных расходах воды, поступающей из реки. Приведен пример расчета периода полного опорожнения Сионского водохранилища.

Изданию фундаментальной монографии способствовали многочисленные публикации авторов в ведущих журналах России, стран Закавказья, Белоруссии, Грузии и доклады на научно-технических конференциях, за что авторы благодарят членов редколлегии сборников научных журналов и международных конференций, а также Национальный научный фонд Грузии им. Ш. Руставели за финансовую поддержку.

Литература

1. **Бердзенашвили Г., Иремашвили Х.** Методология оценки и прогнозирования рисков размыва земляных плотин при подтоплении глубокого водохранилища. //VI Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства», Тбилиси, 2016, с. 95-98 (на грузинском языке);
2. **Гавардашвили Г., Кухалашвили Э., Купрейшвили Ш., Гавардашвили Н.** Эластичный селерегулирующий бараж. Патент, идентификационный код AP14656, 2018 (на грузинском языке);
3. **Гавардашвили Г., Кухалашвили Э., Супаташвили Т., Иремашвили И., Бзиава К., Натрошвили Г., Купарашвили И.** Оценка рисков безопасности уязвимых инфраструктурных объектов при формировании ожидаемых катастроф. Тбилиси, «Универсал», 2022, 170 с. (на грузинском языке);
4. **Гавардашвили Г.** Методические рекомендации по защите от лесных пожаров. Тбилиси, 2017, 82 с. (на грузинском языке);
5. **Григолия Г., Кереселидзе Д., Трапаидзе В., Брегвадзе Г.** Оценка частоты наводнений и ливневых паводков реки Мтквари //Сборник трудов Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, № 69, «Универсал», Тбилиси, 2014, с. 69-73 (на грузинском языке);
6. **Диаконидзе Р., Чахая Г., Цулукидзе Л., Варазашвили З., Супаташвили Т., Купрейшвили Ш., Мтиулишвили Н.** Экологические проблемы Тбилисского моря и меры их предотвращения. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства Грузинского технического университета, № 68, «Универсал», Тбилиси, 2013, с. 57-63 (на грузинском языке);
7. **Диаконидзе Р.** Глобальное потепление планеты и сели. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства, «Универсал», Тбилиси, 2005, с. 21-23 (на грузинском языке);
8. **Дохнадзе Г.** Методы исследований в военной географии. «Лега», Тбилиси, 2007, 76 с. (на грузинском языке);
9. **Тевзадзе Т., Иорданишвили И., Поцхверия Д.** Динамика качества воды в искусственных водохранилищах аридной зоны восточно-западной Грузии и прилегающей к ним геоэкологической территории. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства Грузинского технического университета, № 67, «Универсал», Тбилиси, 2012, с. 84-93 (на грузинском языке);
10. **Иорданишвили И., Гавардашвили Г., Иремашвили И., Иорданишвили К.** Толковый словарь гидротехнической терминологии. «Универсал», Тбилиси, 2021, 371 с. (лексикон) (на грузинском языке);
11. **Иорданишвили И., Вартанов М., Иорданишвили К., Иремашвили И., Биланишвили Л.** Эффективность использования гидроресурсов Грузии для производства электроэнергии. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, № 75, «Универсал», Тбилиси, 2022, с. 101-107 (на грузинском языке);
12. **Иорданишвили И.** Оценка экологической надежности берегоукрепительных мероприятий горных водохранилищ. //Ж. «Энергия», № 4, Тбилиси, 1997, с. 48-50 (на грузинском языке);
13. **Иорданишвили И.** Обеспечение надежности берегоукрепительных мероприятий горных водохранилищ. //Сборник докладов международной конференции «Эрозионно-седиментационные явления и некоторые связанные с ними проблемы», Грузгидроэкология, «Универсал», Тбилиси, 2001, с. 87-92 (на грузинском языке);

14. **Иорданишвили И., Иорданишвили К., Натрошвили Г., Поцхверия Д., Канделаки Н., Биланишвили Л.** Оценка суффозионных и фильтрационных процессов Сионской земляной плотины. //Сборник трудов Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, № 70, «Универсал», Тбилиси, 2015, с. 72–76 (на грузинском языке);
15. **Иорданишвили И., Иорданишвили К.** Особенности формирования и использования основных природных запасов и водных ресурсов Восточной Грузии. «Универсал», Тбилиси, 2008, 144 с. (монография) (на грузинском языке);
16. **Иорданишвили И., Иорданишвили К.** Особенности формирования и использования основных природных запасов и водных ресурсов Западной Грузии. «Универсал», Тбилиси, 2008, 158 с. (монография) (на грузинском языке);
17. **Иорданишвили И., Иорданишвили К.** Горные водохранилища Грузии и их влияние на окружающую среду. «Универсал», Тбилиси, 2010, 340 с. (монография) (на грузинском языке);
18. **Иорданишвили И., Иорданишвили К.** Кадастр водохозяйственных сооружений Грузии. «Универсал», Тбилиси, 2015, 223 с. (монография) (на грузинском языке);
19. **Иорданишвили И., Иорданишвили К., Чарбадзе З., Джавахишвили Л.** Оценка экологической надежности процессов осадконакопления в горных водохранилищах Грузии. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства Грузинского технического университета, № 66, «Универсал», Тбилиси, 2011, с. 93–97(на грузинском языке);
20. **Иорданишвили И., Иорданишвили К., Хосрошвили Э.** Оценка уязвимости водохранилищных систем. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства, № 68, «Универсал», Тбилиси, 2013, с. 103–107 (на грузинском языке);
21. **Иорданишвили И., Иремашвили И., Иорданишвили К., Мгебришвили М., Купарашвили И., Натрошвили Г., Поцхверия Д., Канделаки Н., Биланишвили Л.** Определение времени опорожнения и наполнения водохранилищ // X Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства». «Универсал», Тбилиси, 2021, с. 72–78 (на грузинском языке);
22. **Иорданишвили И., Иорданишвили К., Хосрошвили Э., Натрошвили Г., Поцхверия Д., Биланишвили Л.** Эффективность использования энергетических ресурсов горных водохранилищ и их каскадов // Сборник научных трудов Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, № 74, «Универсал», Тбилиси, 2019, с. 51–64 (на грузинском языке);
23. **Иорданишвили И., Иремашвили И., Иорданишвили К., Поцхверия Д., Канделаки Н., Биланишвили Л.** Влияние стихийных бедствий, усиленное глобальным потеплением, на водные ресурсы Грузии. Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава, №72, «Универсал», Тбилиси, 2017, с. 75–87 (на грузинском языке);
24. **Иорданишвили И., Иремашвили И., Натрошвили Г., Иорданишвили К., Глунчадзе М.** Оценка критического состояния плотин. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, №74, «Универсал», Тбилиси, 2019, с. 65–76 (на грузинском языке);
25. **Иорданишвили И., Иорданишвили К., Хосрошвили Э., Хубулава И.** Глобальное потепление и его последствия. //Ж. «Наука и технологии», №1–3, Тбилиси, 2008, с. 70–75 (на грузинском языке);
26. **Иорданишвили И.** Применение системного анализа при исследовании волновой гидравлики на водохранилищах с гидроэлектростанциями. //Ж. «Энергия», №4(8), Тбилиси, 1998, с. 96–99 (на грузинском языке);
27. **Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Канделаки Н.** Особенности инженерно-экологических проблем горно-предгорных водохранилищ, «Сачино», Тбилиси, 2023, 289 с. (монография) (на грузинском языке);

28. **Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Канделаки Н., Биланишвили Л.** Сейсмические явления, вызванные водохранилищами Грузии. //Сборник докладов Международной конференции молодых ученых «Современные проблемы изучения наук о Земле». IV. Издательство Тбилисского государственного университета им. Ив. Джавахишвили, Тбилиси, 21-22 ноября 2022 г., стр. 26-30 (на грузинском языке);
29. **Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Мгебришвили М., Купарашвили И., Канделаки Н., Хосрошвили Э., Биланишвили Л.** Формирование качества воды и процессы самоочищения в Жинвальском водохранилище. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, № 75, «Универсал», Тбилиси, 2022, стр. 108-116 (на грузинском языке);
30. **Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Канделаки Н.** Волногоящее береговое крепление - модифицированный гексаблок. // Патент U 2025 2211Y, Национальный центр интеллектуальной собственности Грузии, Сакпатенти, 2025 (на грузинском языке);
31. **Иорданишвили К., Иорданишвили И., Иремашвили И., Канделаки Н.** Волногоящее береговое крепление - модифицированный тетраблок. // Патент U 2025 2210Y, Национальный центр интеллектуальной собственности Грузии, Сакпатенти, 2025 (на грузинском языке);
32. **Канделаки Н., Иорданишвили И., Иремашвили И., Купрейшвили Ш., Иорданишвили К.** Разработка новых сооружений, защищающих абразивные берега водохранилищ от размыва. //Сборник докладов Международной научной конференции «Стихийные бедствия в Грузии: мониторинг, предупреждение, ликвидация последствий», Издательство Тбилисского государственного университета им. Ив. Джавахишвили, Тбилиси, 2019, с. 237-243 (на грузинском языке);
33. **Канделаки Н., Купрейшвили Ш.** Профилактические меры по предупреждению развития седиментационных процессов в горных водохранилищах. //Сборник докладов IX Международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства», «Универсал», Тбилиси, 2019, с. 122-129 (на грузинском языке);
34. **Канделаки Н.** Динамика седиментационных процессов Ладжанурского и Ткибульского водохранилищ. //86-я международная научная конференция студентов Грузинского технического университета. Издательство Технического университета, Тбилиси, 2019, с. 30 (на грузинском языке);
35. **Канделаки Н.** Расчет седиментационных процессов Жинвальского, Тбилисского, Храмского, Ткибульского, Шаорского и Ладжанурского водохранилищ и разработка прогностической группы //87-я международная научная конференция студентов Грузинского технического университета. Издательство Технического университета, Тбилиси, 2019 (на грузинском языке);
36. **Канделаки Н., Силагадзе А.** Оценка и прогнозирование седиментационных процессов на дне Сионского водохранилища. //Сборник трудов Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, №72, «Универсал», Тбилиси, 2017, с. 75-99 (на грузинском языке);
37. **Кереселидзе Д.** Гидроэкологические проблемы водохранилищ Грузии. Тбилиси, 1994, 214 с. (на грузинском языке);
38. **Купрейшвили Ш., Супаташвили Т., Дадзиани К., Кикнадзе Х., Маисаия Л.** Влияние промышленных отходов на экологическое состояние окружающей среды. //Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и охрана окружающей среды», Кутаиси, 2012, с. 78-80 (на грузинском языке);
39. **Метревели Г., Мачавариани Л., Гулашвили З.** Преимущества и недостатки водохранилищ. «Самшобло», Тбилиси, 2022, 200 с. (на грузинском языке);

40. **Метревели Г.** Водный баланс Жинвальского водохранилища, ТГУ, Тбилиси, 1999, 38 с. (на грузинском языке);
41. Техническая эксплуатация мелиоративных систем. Учебник, Тбилиси, 2013 (на грузинском языке);
42. Первое национальное сообщение Грузии по конвенции об изменении климата. Тбилиси, 1999 (на грузинском языке);
43. Второе национальное сообщение Грузии по конвенции об изменении климата. Тбилиси, 2009 (на грузинском языке);
44. **Сичинава П., Лобжанидзе З., Купреишвили Ш.** Гидротехническая классификация рек Грузии по характеристикам русла. //Сборник научных трудов Института водного хозяйства Грузинского государственного университета, № 68, «Универсал», Тбилиси, 2013, с. 57–63 (на грузинском языке);
45. **Панчулидзе Дж., Метревели Г.** Критерии оценки воздействия горных водохранилищ на окружающую среду. //Сборник докладов V Международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства». Тбилиси, 2015, с. 288–292 (на грузинском языке);
46. **Курчишвили А., Курчишвили Л.** Элементы теории вероятностей и математической статистики. «Универсал», Тбилиси, 2001, 188 с. (на грузинском языке);
47. **Гутидзе П.** О возможном влиянии крупного водохранилища на сейсмическую активность. //Ж. «Энергия», №4, Тбилиси, 1997, с. 40–42 (на грузинском языке);
48. **Гутидзе П., Русадзе В., Чхиквадзе К.** Ретроспективное исследование сейсмичности Ингурской арочной плотины. //Ж. «Энергия», Тбилиси, 2000, с. 52–58 (на грузинском языке);
49. **Круашвили И., Инашвили И., Купреишвили М., Бзиава К.** Интегрированное управление водными ресурсами. Грузинский государственный аграрный университет, Тбилиси, 2008, 320 с. (на грузинском языке);
50. **Круашвили И., Кухалашвили Э., Инашвили И., Бзиава К.** Сели, риск, прогноз, защита. Тбилиси, 2017, 249 с. (на грузинском языке);
51. **Шавлакадзе М., Натрошвили Г., Иорданишвили И., Самхарадзе М., Диасамидзе Н.** Распределение минеральных и термальных вод на территории Восточной и Западной Грузии и их показатели. // I Международный научный конгресс «Новейшие научные исследования, современные вызовы и перспективы в курортологии», Сборник трудов, Тбилиси, 2025, с. 43–44 (на грузинском языке);
52. Гигиенические требования к составу и качеству воды питьево-сельскохозяйственных и культурно-бытовых водопользователей и предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воде. Приказ Министра труда, здравоохранения и социальной защиты Грузии от 16 августа 2001 г. № 297/Н «Об утверждении нормативов качественного состояния окружающей среды». Официальная пресса Грузии. «Грузинский законодательный вестник», №90, 24.08.2001, стр. 91–93. (на грузинском языке);
53. **Andredaki M., Georgoulas A., Hrisanthou V., Kotsovinos N.** Assessment of reservoir sedimentation effect on coastal erosion in the case of Nestos River, Greece //International Journal of Sediment Research, 29(1), 2014, pp. 34–48;
54. **Basilashvili Ts.** – Reservoirs on the mountain rivers and their safety, 2020;
55. **Bennett S.J., Dunbar J.A., Rhoton F.E., Allen P.M., Bigham J.M., Davidson G.R., Wren D.G.** Assessing sedimentation issues within aging flood-control reservoirs. Reviews in Engineering Geology, 2013, pp. 25–44;
56. **Beritashvili B.** Climate and Climate Change. Georgian Technical University, Tbilisi., 2011, 176 p.;

57. **Bilyway E., Ozbachceci B., Bacanli S., Kiziroğlu G.A.** New Approach to Breakwater Design – 2B Block. //Coastal Engineering Proceedings, Bilyay, №35, 2016;
58. **Boryczko K., Bartoszek L., Koszelnik P., Rak J.** A new concept for risk analysis relating to the degradation of water reservoirs. //Environmental Science and Pollution Research, 25(25), 2018, pp. 25591-25599;
59. **Bretschneider C.L.** Theory for waves of Finite light. Proc. of the seventh conf. on Coastal Engineering, 1961;
60. **Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F., Jones P.D.** Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, J. Geophys. Res., 2006, 111 p.;
61. **Burova V.N.** Abrasion Risk Assessment on the Coasts of Seas and Water Reservoirs. //Geodetski list, 74(2), 2020, pp. 185-98;
62. **Clements F.E.** Research methods in ecology. Linkoln, Nebraska, 1905;
63. **Critical loads and critical limit values.** Edit. H. Raitio. Finland, 1994, 192 p.;
64. **Copinath G., Ashitha M.K., Jayakumar K.V.** Sedimentation assessment in a multipurpose reservoir in Central Kerala. //India, Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11), pp. 4441-4449;
65. **Culling W.** Theory of erosion on soil-covered slopes. //I. Geoe., vol. 73, 2, 1965;
66. **Gavardashvili G.V.** Forecast of Flooded Territories By Flooding In Case of Possible Accident of Shaori Rock fill Dam. //The International Conference on “Protection of Agrobiodiversity and Sustainable Development of Agriculture”. Tbilisi, Georgia, November 24-25, 2010, pp. 295-299;
67. **Gavardashvili G.V., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Quparashvili I., Bziava K., Natroshvili G.** Field Survey and Assessment of Ecological Processes Occurring in the Water Area of Zhinvali Reservoir. //8th International Scientific and Technical Conference “Modern Problems of Water Management, Environmental Protection, Architecture and Construction”. “Universal”, Tbilisi, 2018, pp. 27-34;
68. **Gavardashvili G.V., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Natroshvili G., Quparashvili I.** The Research of Water Levels in the Zhinvali Water Reservoir and Results of Field Research on the Debris Flow Tributaries of the River Tetri Aragvi flowing in it. //International Conference on Engineering and Technology. WASET, Rome, Italy, January 17, 2019, pp. 702-705;
69. **Gavardashvili G.V.** Prediction of Flooded Territories in Case of Possible Breakdown of the Sioni Earth Dam. //International Conference on VAIONT – 1963-2013, Thoughts and analyses after 50 years since the catastrophic landslide. Padua, ITALY, 8-10 October, 2013, pp.417-423;
70. **Georgia’s Second National Communication** to the United Nations Framework Convention on Climate Change. National Climate Research Centre, Tbilisi, 2009;
71. **Georgia’s Third National Communication** of Georgia to the United Nations Framework Convention on Climate Change. National Climate Research Centre, Tbilisi, 2015;
72. **Gerstner F.I.** Theori der Wellen. Gilberts Annabn der Physic. Bol. 32, 1809;
73. **Global Climate Observing System** GCOS implementation plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC, Rep. GCOS 92, WMO/TD 1219, Geneva, Switzerland, 2004, 136 p.;
74. **Haeckel E.** Generelle morphologie der organismen. Bd. I, Berlin, 1866, 574 s.
75. **Hartl I.** Schlepptensionen an Böschungen beim auflaufen von wellen. Österreichische Wassewirtschaft. Heft 11/12, 1978, pp. 238-244;
76. **Hansen A.** Wave setup and design water level. Discussion. I. of the waterway part coastal and ocean division. 1978, pp. 227-340;
77. **Henriksen A., Kamari I., Posch M., Wilander A.** Critical loads of Acidity, Nordic Surface Waters. //AMBIO, V, 21, 1992, pp. 356-363.

78. **Hosseinjanzadeh H., Hosseini K., Kaveh K., Mousavi S.F.** New proposed method for prediction of reservoir sedimentation distribution. //International Journal of Sediment Research, 30(3), 2015, pp. 235-240;
79. **Iordanishvili I., Iordanishvili K., Iremashvili I.** Assessments of ecological reliability of mountain reservoirs given increased frequency of floods (as exemplified by the Sioni Reservoir). //International Symposium on "Floods and modern methods of control measures". "Universal", Tbilisi, 2009, pp. 202-209;
80. **Iordanishvili I., Iordanishvili K., Iremashvili I., Potskhveria D., Khosroshvili E., Kandelaki N.** Modeling procedure of coastal protection shaped blocks with high waves suppressing and interlocking capacity. //4th International scientific and technical conference. «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction». Water management institute; Ecocenter for environmental protection, "Universal", Tbilisi, 2014, pp. 122-128;
81. **Iordanishvili I., Iremashvili I., Iordanishvili K., Bilanishvili L., Potskhveria D., Kandelaki N., Sukhishvili N.** Graph analytical method of forecasting the transformation of abrasion banks of highland water reservoirs. //VII International Scientific and Technical conference "Modern Problems of water management, environmental protection, architecture and construction". "Universal", Tbilisi, 2017, pp. 52-60;
82. **Iordanishvili K, Iordanishvili I., Bziava K., Kandelaki N., Supatashvili T., Omsarashvili G., Khosroshvili E., Potskhveria D., Bilanishvili L.** Formation of Water Quality Selfcleaning Processes in the IsaniSamgori Filter Station of the Tbilisi Reservoir. // Ts. Mirtskhulava of Water Management Institute, Georgian Technical University, Tbilisi, Collected Papers №76, "Universal", 2023, pp. 39-46;
83. **Iordanishvili I., Iremashvili I., Iordanishvili K., Beraia N., Kandelaki N., Mgebrishvili M., Bziava K., Bilanishvili L.** Development of a novel modified tetrablock for wavedissipating reservoir bank protection against erosion. /XII International Scientific and Technical conference "Modern Problems of water management, environmental protection, architecture and construction". Tbilisi, 2025, pp. 98-100;
84. **Iordanishvili I., Kandelaki N., Iremashvili I., Iremashvili A., Iordanishvili A.** "Gamma -Block" – A new structure for protecting abrasive shores of water bodies from erosion. //Czestochowa University of Technology. Scientific papers. 2024 <https://znb.pcz.pl/en/issues/i ssue-no-30>, pp. 45-60;
85. **Iordanishvili K., Qigley B., Matcharadze C.** Integrated sediment management plan of the cascade of reservoirs on the river Rioni. //Aqua-Media International Ltd. POBOX 285 Wallington Surrey SM6 6 AN/ UK Gernobbio. Italy International journal on Hydropower &Dams, 2014, 2 p.;
86. **Jain S.K., Singh V.P.** Water Resources Systems Planning and Management. Elsevier, 2003, 882 p;
87. **Jonson D.W.** Shore Process and Shoreline Development, 1966;
88. **Kandelaki N., Iordanishvili I., Iremashvili I., Ujma A., Shurgaya V., Iordanishvili K.** Modeling procedure of coastal protection shaped blocks with high wave suppressing and interlocking capacity. //XXII International scientific conference on advances in civil engineering construction the form of living environment, Uzbekistan, Tashkent, E3S Web oxcont, 2019;
89. **Kandelaki N., Iordanishvili I., Ujma A., Iremashvili I., Iordanishvili K., Kupreishvili Sh., Shurgaya V., Natroshvili G.** Impact of natural disasters on water resources of Georgia caused by global warming. //Archives of Hydro-Engineering and environmental mechanics. Institute of Hydro-engineering of the Polish Academy of Sciences, Vol. 66, №1-2 (2019), pp. 15-26;
90. **Kandelaki N., Iordanishvili K., Iordanishvili I., Iremashvili I., Bilanishvili L.** Innovative Construction Protecting the Abrasive banks of Reservoirs from Being Washed Away. //Georgian National Academy of sciences Bulletin, 2025;
91. **Kandelaki N., Kupreishvili Sh.** Efficiency of water reservoir construction in mountainous areas. //VIII International scientific and technical conference "Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction", "Universal", Tbilisi, 2018, pp. 142-155;

92. **Karoly D.J., Stott P.A.** Anthropogenic warming of central England temperature, //Atmos. Sci. Lett., 7, 2006, pp. 81-85;
93. **Kosyan R.D., Krylenko M.V.** Sea of Azov coasts. Estuarine, 2019, 224, pp. 314-323;
94. **Kutuzov S.S., Mikhalenko V.N., Grachev A.M., Ginot P., Lavrentiev I.I., Kozachek A.V., Krupskaya V.V., Ekaykin A.A., Tielidze L.G., Toropov P.A.** First geophysical and shallow ice core investigation of the Kazbek plateau glacier, Caucasus Mountains. //Environmental Earth Sciences ,vol. 75, art. 1488, 2016;
95. **Lagidze L., Matchavariani L., Metreveli G., Tsivtsivadze N., Paichadze N., Gulashvili Z., Svanadze D.** Evaluation of Climate Parameters of Black Sea Coastline in the Background of Climate Change. //Journal of Environmental Biology. Special Issue "Environment and Ecology", vol. 38(5), 2017, pp. 1069-1077;
96. **Li D., Lu X., Overeem Ir., Walling D.E., Syvitski J., Kettner A.J., Bookhagen B., Zhou Y., Zhang T.** Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia. Science 2021, pp. 374, 599-603;
97. **Li Jia-qing, Li W., Zhang Sh., Ndakeva H.** Water resources and geography education in China. //International Symposium on floods and modern methods of control measures, Tbilisi, 2009;
98. **Loucks D.P., Eelco van Beek.** Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods models and Applications. Springer, 2017, 624 p.;
99. **Mansikkamaki H.** Monthly sedimentation in some reservoirs of hydroelectric stations in Finland. //Fennia-International Journal of Geography, 2013, 143 (1);
100. **Marco J.B., Harboe R., Salas J.D. (Ed.).** Stochastic Hydrology and it's in Water Resources Systems Simulation and Optimization. //Springer Science & Business Media, NATO ASI Series E: Applied Science, vol. 237, 2012, 483 p.;
101. **Matchavariani L., Lagidze L.** Environment Transformation in Georgia as a Result of Climate Change. Environment and Ecology in the Mediterranean Region, Chapter 35, Cambridge Scholars Publishing, UK, 2012, pp. 379-392;
102. **Matchavariani L., Metreveli G., Lagidze L., Paichadze N.** Siltation Problem of Mountainous Reservoirs and its Solution for Sustainable Hydropower. //16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & Expo SGEM2016. Proceedings, book 3 "Water Resources, Forest, Marine & Ocean Ecosystems", vol. 1 "Hydrology & Water Resources", Albena, Bulgaria, 2016, pp. 661-667;
103. **Mehta V.M., Suares M.J., Manganello J.V., Delworth T.L.** Oceanic influence on the North Atlantic oscillation and associated Northern Hemisphere climate variations: 1959-1993, Geophys. Res. Lett., 27, 2000, pp. 121-124;
104. **Metreveli G., Matchavariani L., Gulashvili Z.** Method for Hydrological Parameters Definition of Silting Prism and Equilibrium Bed in Water Reservoirs. //Proceedings of the 19th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Bulgaria, 2019, vol. 19(3.1), pp. 363-368;
105. **Metreveli G., Metreveli L.** Research Method of Silting the Mountain Reservoirs Under the Current Climate Change. //Journal of Water Resources and Ocean Science. Science Publishing Group, 5(2), 2016, pp. 22-27;
106. **Metreveli G.S., Metreveli M.G.** Background Factors of Global Climate Warming in the Coastal Zone of the Black Sea. //Water Resources, vol. 28, №5, 2001, pp. 568-573;
107. **Miche M.B.** Movements on du toires de la mere en profondeur constante ou decroissante. Ann. Points et ohausses, 4,114, №3, 1954, pp. 4-6;
108. **Odilavadze T., Bziava K., Bagration-Davitashvili A., Inashvili I.** Ecological strategy for rational use of water resources. //VII International scientific and technical conference "Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction". "Universal", Tbilisi, 2017, pp.153-155;

109. **Parker D., Folland C., Scaife A., Knight J., Colman A., Baines P., Dong B.** Decadal to multidecadal variability and the climate change background. //Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 112 (D18115), 2007;
110. **Patriadi A., Soemitro R., Warnana D., Wasis Wardoyo, Toshifumi Mukunoki and Gozo Tsujimoto** The Influence of Sembayat Weir on Sediment Transport Rate in the Estuary of Bengawan Solo River. //Indonesia. Intern. Journal of GEOMATE, vol. 20, Issue 81, 2021, pp. 35-43;
111. **Ran L., Lu X., Xin Z., Yang X.** Cumulative sediment trapping by reservoirs in large river basins: A case study of the Yellow River basin. Global and Planetary Change, 100, 2013, pp. 308-319;
112. **Reid J.R.** Mechanisms of shoreline erosion along lakes and reservoirs. In Proceedings, US Army Corps of Engineers Workshop on Reservoir Shoreline Erosion: A National Problem, 1992, pp. 18-32;
113. **Savilli T.** Model Study of sand transport a long uninfinieex kong. //Тачу, V. 31, №4, 1950;
114. **Soares F., Henrigues M.J., Roca C.** Concrete block tracking in breakwater models. //Conference: FIG Working Week, Helsinki, 2017;
115. **Solomon S., Daniel J.S., Neely R.R. III, Vernier J.-P., Dutton E.G., Thomason L.W.** The Persistently Variable "Background" Stratospheric Aerosol Layer and Global Climate Change. //Science, vol. 333(6044), 2011, pp. 866-870;
116. **Sorokina O.A., Petrova L.E., Dontsov A.V., Fedorinov A.V., Antropov D.V.** Protection of coastal territories of Russian water reservoirs using land management methods. //InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 350, No. 1, p. 0120070. IOP Publishing, 2019,;
117. **Starodubtsev V.M., Bogdanets V.A.** Dynamics of the Tsimlyansk Reservoir Coastline. //S. World Journal, 1102, 2016, pp. 7-15;
118. **Stoker G.G.** On the oscillatory waves. Trans. Cambridge Philosophical Society, 8, 1847;
119. **Summary of the working groups report.** IPCC, WMO, UNEP. Cambridge, UK, 1996;
120. **Thompson D.W., Wallace J.M.** Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. //Science, 293, 2001, pp. 85-89;
121. **Varazashvili N.G., Iordanishvili (Radchenko) I.K.** Distribution of velocities of running up flow on slopes affected by waves, //XX conares De LiRH Volume VII, ВИНТИ, М., 1983, pp. 154-158;
122. **Volterra V.** Fluctuations in the Abundance of a Species considered Mathematically. Nature, 1926;
123. **Zhang R., Delworth T.L., Held I.M.** Can the Atlantic Ocean drive the observed multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? //Geophys. Res Lett., 34, 2007, L02709;
124. **Zhenkin Bao, Guobin Fu, Guoqing Wang, Junliang Jin, Ruimin He, Xiaolin Yan, Cuishan Liu** Hydrological projection for the Miyun Reservoir basin with the impact of climate change and human activity. //Quaternary International, vol. 282, 2012, pp. 96-103;
125. **Авакян А.Б., Яковлева В.Б.** Новые данные о водохранилищах мира. //Ж. «Гидротехническое строительство», №3, М., 1999, стр. 8-12;
126. **Алтуний С.Т.** Регулирование русел рек. "Сельхозиздат", М., 1964;
127. **Андреанов В.Г.** Ветровая волна озеровидных водоемов. Изд. ВНИИГ, стр.24-25, 1939;
128. **Андреев И.Д.** Основы теории подобия. Изд. АН СССР, М., 1959;
129. **Аравин В.С., Нумеров С.Н.** Теория движения жидкостей и газов в неоднородной пористой среде. М., 1953;
130. **Барабанова Е.А.** Глобально-региональные особенности регулирования стока рек под влиянием водохранилищ (по косвенным методам). //Вопросы географии, №133, География и гидрологические исследования. "Кодекс", М., 2012, стр. 297-311;
131. **Беднарук С.Е., Меговилов Ю.Г.** Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ. //Ж. «Гидротехническое строительство», №7, М., 2017, стр. 22-35;

132. **Безель В.С., Кряжимский Ф.Н., Семериков Л.Ф., Смирнов Н.Г.** Экологическое нормирование антропогенных нагрузок. // "Метеорология, экология", №1, М., 1993, стр. 36-47
133. **Божич П.К., Джунковский И.Н.** Морское волнение и его действие на сооружения и берега, 1949;
134. **Божич П.К.** Производство волновых наблюдений и исследований. „Речиздат“, 1949;
135. **Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Нетюхайло А.П., Шеренков И.А.,** Справочник по гидравлике. "Выща школа", Киев, 1984, 343 стр.;
136. **Большаков В.Н., Кряжимский Ф.Б., Павлов Д.С.** Перспективные направления развития экологических исследований в России. // "Экология", №3, М., 1993, стр. 3-16;
137. **Браславский А.П.** Расчет ветровых волн, ГГИ вып. 35, (88), 1952;
138. **Брейтман В.М.** Примеры сопоставления анализов подобия классического и интегрального методов. //Сб. докл. "IV-ой международной конференции по применению физического и математического моделирования в различных отраслях техники", М., 1962;
139. **Бретшнейдер К.Л.** Образование волн на глубокой и мелкой воде. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. "Гидрометеиздат", Л., 1970, стр. 7-67;
140. **Будыко М.И.** Климат в прошлом и будущем. "Гидрометеиздат", Л., 1980;
141. **Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н.** Инженерно-экологические проблемы создания и эксплуатации водохозяйственных систем с водохранилищами в горных условиях. "Мецниереба", Тбилиси, 2002, 512 стр.;
142. **Варазашвили Н.Г., Иорданишвили И.К.** Мероприятия и сооружения для защиты берегов водохранилищ в условиях горных районов. Экзогенные процессы и проблемы рационального использования геологической среды. САИГИМС, Ташкент, 1985, стр. 59-64;
143. **Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н.** Особенности формирования водного хозяйства горных регионов. "Мецниереба", Тбилиси, 1996, 234 стр.;
144. **Варазашвили Н.Г., Макацария А.П.** Классификация берегов горных водохранилищ применительно к задачам прогноза их переформирования. //Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 96, Л., 1974, стр.106-113;
145. **Варазашвили Н.Г.** Основы методики прогноза формирования ложа водохранилищ горных регионов. //Сб. докладов «Международной конференции по эрозионно-селевым явлениям и смежным проблемам». АН Грузии, Институт Грузводэкология, Тбилиси, 2001, стр.53-59;
146. **Варазашвили Н.Г., Тевзадзе Т.В.** Динамика формирования ложа водохранилищ горных регионов и особенности методики прогнозирования. //Сборник трудов V конференции "Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей". М., 1999, стр. 384-386;
147. **Варганов М.В., Иорданишвили И.К., Кечхошвили И., Бераия Н., Шагирадзе М.,** К вопросу прогнозирования опасных аварий и катастроф на действующих водохранилищах Грузии; //Сборник докладов интернет-научно-практической конференции «Приоритеты стабилизации и развития сектора сельскохозяйственного машиностроения Грузии в период пандемии коронавируса и ее последствий», «Агро», Тбилиси, 2020, с. 49-58;
148. **Вендров С.Л.** Крупные водохранилища и задачи комплексного использования и охраны водных ресурсов. //Тр. совещания по гидрологии и инженерной геологии на Днепровских водохранилищах, ДГУ, 1962;
149. **Вентцель Е.Р.** Теория вероятностей. "Наука", М., 1964, стр. 576;
150. **Воропаев Г.В., Авакян А.Б.** Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду. "Наука", М., 1986, 387 стр.;
151. **Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Варганов М.В.** Современные проблемы мелиорации в условиях исследования водных ресурсов трансграничной реки Кура. //Ж. «Мелиорация», РУП, Институт Мелиорации, 2(74), 2015, стр. 25-33;

152. **Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., Иремашвили И.Р.** Влияние изменения климата на водные ресурсы бассейна р. Кура. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. //Вестник Брестского государственного технического Университета, №2, 2020, стр.10-14;
153. **Гавардашвили Г.В.** Компьютерная имитация наводнения в случае разрушения Ингурской плотины. //Сб. научных трудов Института водного хозяйства Грузии, №65, Тбилиси, 2010, стр. 42-52;
154. **Гайар Д.Д.** Работа волн и инженерные сооружения. Военно-инженерный Институт США, 1994;
155. **Гвелесиани Л.Г., Шмальцель И.П.** Заиление водохранилищ гидроэлектростанций, //Ж. «Энергия», Тбилиси, 1988, стр. 86;
156. **Гвелесиани Л.Г., Шмальцель И.П.** Опыт эксплуатации горных водохранилищ, //Ж. «Гидротехническое строительство», №5, 1953;
157. **Глазовская М.А.** Геохимия природных и техногенных ландшафтов. "Высшая школа", М., 1988, 328 стр.;
158. **Глушков В.М.** О прогнозировании на основе экспертных оценок. //Ж. «Кибернетика», №2, М., 1969;
159. **Гогелиани Л.Д.** Гидравлическая модель обвала-оползня горной породы, вторгающегося в водоем под воздействием сейсмических сил. //Сб. трудов «Международной конференции по русловым процессам, гидравлике трубопроводного транспорта, гидротехнических сооружений и вопросам гидроэнергетики», Тбилиси, 2000, стр. 30-32;
160. **Горелик А.Л., Скрипкин В.Л.** Методы распознавания. "Высшая школа", М., 1977;
161. **Григорьев О.Г.** Проверка оправдываемости прогнозов переформирования берегов Волгоградского водохранилища, тр. ГГИ, вып. 116, "Гидрометиздат", Л., 1964;
162. **Даденков В.Ю., Клещевникова Т.П., Железняк И.А.** Справочник по гидравлике. "Вища школа", Киев, 1984, 343 стр.;
163. **Дорожкина О.П.** Управление водными ресурсами в условиях трансграничного бассейна. //Ж. «Мелиорация и водное хозяйство», №5, М., 2013, стр. 24-27;
164. **Джакели Х.Т.** Характеристика элементов климата. Физическая география Закавказья. Издательство Ереванского Университета, Ереван, 1986, стр. 87-96;
165. **Джонсон Н., Лион Ф.** Статистика и планирование экспериментов в технике и науке. Методы обработки данных. "Мир", М., 1980, с. 99-183;
166. **Джунковский Н.Н.** Действие ветровых волн на гидротехнические сооружения. "Стройиздат", М., 1940;
167. **Духовный В.А., Соколов В.П., Зиганшина Д.Р.** Проблемы совместного использования соседними странами трансграничных водотоков. //Ж. «Мелиорация и водное хозяйство», №2, М., 2015, стр. 32-37;
168. **Жуковец А.М., Зайцев Н.Н.** Воздействие волн на сооружения откосного типа. "Госстройиздат", М., 1956;
169. **Золотарев Г.С.** Инженерно-экологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки. //Труды лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР, т. 12, М., 1956, стр. 84-94;
170. **Иванов В.М.** Проектирование водохранилищ в современных условиях, //Ж. «Гидротехническое строительство» №8, М., 2012, стр. 66-68;
171. **Иванов А.Д., Лаппо А.Д., Солдаткин В.А.** Применение и реализация численных алгоритмов для расчета волнового режима на огражденных акваториях. //ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, М., 226, 1992, стр.72-83;

172. **Израэль Ю.А.** Экология и контроль состояния природной среды. "Гидрометеиздат", М., 1984, 560 стр.;
173. **Иманов Ф.А.** Водные ресурсы и их использование в трансграничном бассейне р. Кура. Санкт-Петербург, 2016, 104 стр.;
174. **Иорданишвили И.К., Гавардашвили Г.В., Иремашвили И.Р., Варганов М.В., Иорданишвили К.Т.** Кадастр водных запасов Грузии. "Универсал", Тбилиси, 2018, 260 стр. (монография);
175. **Иорданишвили И.К.** Динамика внутриводоемных процессов горных водохранилищ Грузии. "Мецниереба", Тбилиси, 2004, 194 стр. (монография);
176. **Иорданишвили И.К., Варганов М.В., Варганов А.М.** Компьютерный расчет внутриводоемных процессов в горных водохранилищах. //Сб. трудов Института водного хозяйства, №65, Тбилиси, 2010, стр. 83-87;
177. **Иорданишвили И.К., Варганов М.В.** Моделирование процесса взаимодействия волн с береговыми откосами, укрепленными каменной наброской и фасонными массивами. //Сб. научных трудов Института водного хозяйства Технического Университета, №66, Тбилиси, "Универсал", 2011, стр. 98-103;
178. **Иорданишвили И.К.** Возможности оптимального использования системного анализа при изучении гидрологических процессов в горных водохранилищах. //Ж. "Энергия", №1 (13), Научно-исследовательский институт энергетики, Тбилиси, 2000, стр.96-99;
179. **Иорданишвили И.К.** Основные положения достоверного расчета элементов берегозащитных сооружений на водохранилищах в условиях горных регионов. //Международная конференция по русловым проблемам, гидравлике трубопроводного транспорта, гидротехнических сооружений и вопросам гидроэнергетики, Грузинский Технический Университет, Академия наук Грузии, Тбилиси, 2000, стр. 49-52;
180. **Иорданишвили И.К.** Особенности развития внутриводоемных процессов на горных водохранилищах. //Ж «Водные ресурсы», т. 22, №6, М., 2000, стр. 678-686;
181. **Иорданишвили И.К.** Особенности расчета берегозащитных сооружений на горных водохранилищах. //Труды Общероссийской конференции «Оценка и управление природными рисками», т. II, М., 2003, стр. 339-343;
182. **Иорданишвили И.К.** Особенности режима мелководий горных водохранилищ Грузии. Сборник трудов Института водного хозяйства и инженерной экологии "Экологическая устойчивость, безопасность, надежность", Тбилиси, 2003, стр. 54-60;
183. **Иорданишвили И.К.** Откосные крепления с повышенной волногасящей способностью для защиты берегов горных водохранилищ. //Ж. «Энергия», №4 (24), Тбилиси, 2002, стр. 166-169;
184. **Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т.** Вопросы эволюции горных водохранилищ Грузии. "Универсал", Тбилиси, 2012, 186 стр. (монография);
185. **Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Джавахишвили Л.Г.** Исследование эффективности возможности использования фасонных массивов на размываемых берегах Аджарии Сб. Научных трудов Института водного хозяйства Грузии, №65, Тбилиси, 2010, стр. 88-94;
186. **Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Канделаки Н.В.** Оценка занесения горных водохранилищ Грузии. //Сб. докладов Международной научно-технической конференции «Современные проблемы охраны окружающей среды, архитектуры и строительства». "Универсал", Кобулет, 2012, стр. 70-75;
187. **Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Хубулава И.** Проблемы антропогенного изменения климата. //Ж. «Экологические системы и приборы», №5, М., 2009, стр. 55-57;

188. **Иорданишвили И.К.** Оценка надежности укреплений плотин и горных водохранилищ. //Сборник докладов международного симпозиума, посвященного проблемам проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. Тбилиси, 2000, с. 147-149;
189. **Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В.** Динамика формирования ложа водохранилищ Грузии. //Сб. докладов VI-ой Международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства». "Универсал", Тбилиси, 2016, стр. 78-89;
190. **Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В.** Практический метод прогноза абразионных процессов на берегах горных водохранилищ, Ж. «Водные проблемы, наука и техника», Баку, 2018, стр. 27-38;
191. **Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Итришвили Л.А., Иорданишвили К.Т., Натрошвили Г.Т., Хосрошвили Е.З., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б.** Динамика качества вод горных и предгорных водохранилищ Грузии. //Сборник докладов IX-ой Международной научно-технической конференции "Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства", "Универсал", Тбилиси, 2019, стр. 95-107;
192. **Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б.** Управление водными ресурсами Грузии в условиях трансграничных рек. //Сборник трудов института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, №71, "Универсал", Тбилиси, 2016, стр. 62-78;
193. **Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б.** Методика моделирования формирования береговых откосов горных водохранилищ при волновом воздействии. //Сб. докладов VIII-й Международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства», "Универсал", Тбилиси, 2018, стр. 119-125;
194. **Иорданишвили-Радченко И.К.** Оценка верхней границы береговых креплений водохранилищ с использованием статистической теории распознавания образов. Инженерные методы прогноза и борьба с эрозией почв. Тбилиси, 1987, стр. 98-101;
195. **Караушев А.В.** Теория и методы расчета речных наносов. "Гидрометеиздат", Л., 1977, стр. 210-258;
196. **Караушев А.В.** Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. "Гидрометеиздат", Л., 1960;
197. **Качугин Е.Г.** Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ. "Наука", М., 1975, 146 стр.;
198. **Киселев П.Г.** Справочник по гидравлическим расчётам. "Энергия", М., 1972, 312 стр.;
199. **Колмогоров А.Н.** Об аналитическом методе в теории вероятностей. Успехи математических наук, вып. 5, 1938;
200. **Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю.** Изменение локализации природных зон при глобальном потеплении. //Ж. «Экология», №3, 1992, стр. 9-18;
201. **Кожевников Н.М.** Гидравлика ветровых волн, //Ж. «Энергия», М., 1972;
202. **Кондратьев К.Я.** Ключевые аспекты экологической политики. //«Экодинамика», Изв. русского географического общества, т.127, вып. 3, 1995, стр. 1-10;
203. **Кондратьев Н.Е.** Расчеты береговых переформирований на водохранилищах. "Гидрометеиздат", Л., 1960, 230 стр.;
204. **Корнеева Л.А., Ливерди В.Г.** Экспериментальная проверка ускоренной методики расчета волн в море произвольной глубины, //Тр. координационных совещаний по гидротехнике, ВНИИГ, вып. 50, Л., 1969;

205. **Кристен Н.И.** Подземная гидравлика, 4.1. II, М., 1961;
206. **Красножон Г.Ф., Сидорова А.Г.** Трансформация волн на мелководье. Управление поверхностными и подземными водными ресурсами и их использование. АН СССР, М., 1961, стр. 161-208;
207. **Крылов Ю.М.** Ветровые волны. "И.Л.", 1962, стр. 27-30;
208. **Кульчицкий И.В., Бураков М.И.** Исследование взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями откосного типа. "Речной транспорт", М., 1961, стр. 42-45;
209. **Лабзовский Н.А.** Определение элементов волн в зависимости от скорости ветра. Сб. трудов, ЛОНИ ОВТ, 1956;
210. **Литвиненко Г.И., Стрекалов С.С.** Расчет массы элементов крепления откосов оградительных сооружений морских берегов. //Ж. «Гидротехническое строительство», №3, М., 2002 г., стр. 18-222;
211. **Логинов В.В.** Динамика береговой зоны бесприливных морей. АН СССР, М., 1963;
212. **Лупинский М.П., Юрков Ю.В.** Рекомендации по расчету и конструированию креплений напорных откосов земляных сооружений. //Сб. совещания "Пути улучшения и удешевления строительства", М., 1961;
213. **Максимчук В.Л., Аверин В.П., Степчук Е.И.** //Сб. "Вопросы переработки берегов водохранилищ", изд. АНУССР, 1962;
214. **Мамедов А.Ш., Мамедли А.А.** Заиление горных водохранилищ и борьба с ним. //Сб. докладов VI-ой Международной научно-технической конференции "Современные проблемы водного хозяйства, охрана окружающей среды, архитектура и строительство". "Универсал", Тбилиси, 2016, стр. 121-125;
215. **Марьин В.А.** Ветровое волнение в озеровидных бьефах. Водный транспорт. М., 1930;
216. **Марков К.К., Лазуков Г.И., Николаев В.А.** Четвертичный период. Ледниковый период. Антропогенный период, т. 1-3, М., 1965-1967;
217. **МГЭИ,** Пятый доклад, 2013;
218. **Международная конференция** "Анализ и оценка природных рисков в строительстве", М., 1997;
219. **Методические указания** по расчету поступления биогенных элементов в водоемы от рассредоточенных нагрузок и установление водоохраных мероприятий. М., 1988;
220. **Метревели Г.С.** Водоохранилища Закавказья, 1985, Тбилиси, 131 стр.;
221. **Метревели Г.С.** Особенности режима уровней и баланса воды горных водохранилищ Грузии. //Сборник резюме докладов II конгресса. НРБ, Варна, 1973, стр. 110-111;
222. **Мирцхулава Ц.Е.** Безопасность плотин: состояние проблемы, пути решения. //Ж. "Мелиорация и водное хозяйство", №10, 1989, стр. 11-18;
223. **Мирцхулава Ц.Е.** Водная эрозия почв. "Мецниереба", Тбилиси, 2000, 421 стр.;
224. **Мирцхулава Ц.Е.** Надёжность гидромелиоративных сооружений. "Колос", М., 1974, 279 стр.;
225. **Мирцхулава Ц.Е.** Об экологически целесообразном сроке эксплуатации потенциально опасных сооружений различного назначения. //Сб. тр. "Экологическая безопасность, устойчивость и надёжность водохозяйственных и гидромелиоративных объектов", Грузгидроэкология, Тбилиси, 2005, стр. 112-128;
226. **Мирцхулава Ц.Е.** О возможностях и перспективах системного анализа при оценке устойчивости почв к эрозии. ВАСХНИЛ, №12, М., 1975, стр. 31-32;
227. **Мирцхулава Ц.Е.** Опасности и риски на некоторых водных и других системах. В 2-х томах, "Мецниереба", Тбилиси, 2003, 537 стр.;
228. **Мирцхулава Ц.Е.** Оценка надёжности плотин и других сооружений с учетом интенсивности старения. //Сб. тр. "Современные проблемы водного хозяйства и инженерной экологии". Институт водного хозяйства и инженерной экологии, Тбилиси, 1999, стр. 80-100;

229. **Мирцхулава Ц.Е.** Современные возможности предсказания уязвимого состояния территорий и объектов для катастрофических селей. //Ж. "Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология", №1, "Наука", М., 2006, стр. 57-65;
230. **Мирцхулава Ц.Е.** Возможности оптимального использования системного анализа при изучении гидрологических процессов в горных водохранилищах. //Ж. "Энергия", №1(13), 2000, стр. 105-107;
231. **Мирцхулава Ц.Е.** Экологические нарушения (предсказание риска нарушения). Меры по снижению опасности. Институт гидроэкологии АН Грузии, Тбилиси, 1993, 438 стр.;
232. **Моисеенко Т.И.** Экономический подход. //Ж. "Экология", №6, М., 1998, стр. 452-461;
233. **Мунк У., Витбули М.** Простой критерий разрушения волн на береговом склоне. //Ж. "Океанология", 1. IX, 1969, стр. 71-75;
234. **Никаноров А.М.** Экологическое нормирование антропогенного воздействия на эстуарные водоемы. Методология экологического нормирования. //Тезисы докладов Всесоюзной конференции, Харьков, 1990, стр. 40-41;
235. **Никитин И.К.** К вопросу о расчете ветрового волнения и режим водохранилищ применительно к условиям ср. Азии. //Тр. IV Гидрологического съезда. Л., 1959;
236. **Ногид Л.М.** Теория подобия и размерностей. "Судпромгиз", М., 1967;
237. **Нормализация (статистика).** *ru.gwe*. WikiNormalization, statistika; Нормализация данных: методы и формулы. Bigtaschoolru/blog П.;
238. **Окунь Я.** Факторный анализ. "Статистика", М., 1976;
239. **Павловский Н.Н.** Гидравлический справочник. Л., 1937, стр. 366-371;
240. **Петров Т.Н.** Исследование процессов заиления Нурекского водохранилища. //Ж. "Гидротехника и мелиорация", №10, М., 2008, стр. 11-15;
241. **Печеркин И.А.** Геодинамика побережья Камских водохранилищ. Пермь, 1969;
242. **Положение о водоохраных зонах Грузинской ССР**, 1988;
243. **Поляков Б.В.** Гидрологический анализ и расчеты. Л., 1946;
244. **Пышкин Б.А.** Динамика берегов водохранилищ. "Наукова думка", Киев, 1973, 413 стр.;
245. **Померанец В.И.** Оценка экологической надежности систем сооружений. //Ж. "Водохозяйственное строительство", №3, 1993;
246. **Попов И.Я.** Воздействие волн на откосы земляных плотин. //Тр. "Координационных совещаний по гидротехнике", вып., 75, Л., 1972;
247. **Рекомендации** – «Единые критерии качества вод», Совет Экономической Взаимопомощи (СЭВ), Секретариат СЭВ, 1982, 68 стр.;
248. **Розовский Л.Б.** Введение в теорию геологического подобия и натурального моделирования. "Наука", М., 1968, 198 стр.;
249. **Розовский Л.Б.** Опыт применения метода инженерно-геологических аналогий для прогноза переработки берегов больших водохранилищ. //Труды Одесского Университета, 147. Сер.: геологических и географических наук, 4, 1957;
250. **Салуквадзе Н.И., Гоговадзе М.Г.** Волновой режим горных водохранилищ. //Сб. тр. Института гидротехники и мелиорации, Тбилиси, 1981, стр. 15-16;
251. **Сванидзе Г.** Водные ресурсы Закавказья. "Гидрометеиздат", Л., 1988, 263 стр.;
252. **Сванидзе Г.Г., Гагуа В.П., Сухишвили Э.В.** Возобновляемые энергоресурсы Грузии. "Гидрометеиздат", Л., 1987, 174 стр.;
253. **Свешников Л.Л.** Прикладные методы теории случайных функций. Наука, М., 1998;
254. **Скрыльников В.А.** Расчет заиления водохранилищ. //Ж. "Гидротехническое строительство", №8, М., 1988, стр. 30-33;

255. **Смирнов А.А.** Трансформация волн на пологом склоне. //Ж. "Гидротехника и мелиорация", №1, 1960;
256. **Соловьев Л.П.** Климатические изменения, потепление и похолодание. //Ж. "Экологические системы и приборы", №7, М., 2014, стр. 20-25;
257. **Уйма А., Иорданишвили И., Иремашвили И., Вартанов М., Канделаки Н., Иорданишвили К.** Качество водных ресурсов бассейнов Балтийского и Чёрного морей в условиях потепления климата. //Сб. тр. IX Международной научно-технической конференции "Современные проблемы охраны окружающей среды, архитектуры и строительства". "Универсал", Тбилиси, 2019, стр. 263-277;
258. **Уорсинг А., Геффнер Дж.** Методы обработки экспериментальных данных. М., 1949, 362 стр.;
259. **Фагуллаев Г.Ю.** Современные изменения водных ресурсов и водного режима рек Южного Кавказа, Баку, Изд. БГУ, 2000, 167 стр.;
260. **Фагуллаев Г.Ю.** Разработка нового методического подхода оценки возможных изменений водных ресурсов и водного режима рек бассейна Куры в условиях глобального потепления климата. //Докл. межд. конф. "Новые подходы и методы в изучении природных и природно-хозяйственных систем". Алматы, 2000, стр. 209-212;
261. **Финаров Д.П.** Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР. "Энергия", Л., 1974, 243 стр.;
262. **Флинт Р.Ф.** Ледники и палеография плейстоцена. Пер. с англ., 1963;
263. **Хасхачик Г.Д.** Механизм разрушения ветровых волн на наклонной стене. //Ж. "Гидротехническое строительство", №6., 1957, стр. 33-38;
264. **Хаширова Т.Ю., Ламердонов З.Г., Кузнецов Е.В.** Системный подход в решении экологических проблем охраны горных и предгорных ландшафтов с управлением твердого стока. //Ж. "Экологические системы и приборы", №9, М., 2007, стр. 29-33;
265. **Херхеулидзе Г.И.** К определению нагрузок от воздействия селевого потока на поперечные преграды. Тр. Зак. НИГМИ, вып. 40(46), Гидрометеоиздат, Л., 1972, стр. 76-113;
266. **Хмаладзе Г.Н.** Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа. "Гидрометеоиздат", Л., 1978, стр. 165-166;
267. **Чантладзе З.И.** Особенности формирования химического состава и химическое качество поверхностных вод Грузии, Тр. ГГИ, 167, 1972, стр. 186-196;
268. **Чоговадзе Г.И., Мгебришвили И.М., Ломов И.Е.** Ингурская гидроэлектростанция. "Энергоатомиздат", М., 1987, 200 стр.;
269. **Шайтан В.С.** Некоторые результаты исследований наката нерегулярных волн на откосы сооружений. //Труды координационных совещания по гидротехнике, 50, "Энергия", Л., 1969, стр. 437-444;
270. **Шанкин П.А.** О границах креплений откосов, подверженных воздействию волн. //Ж. "Гидротехническое строительство", №9, 1958;
271. **Шамов Г.И.** Речные наносы. "Гидрометеоиздат", Л., 1969, 348 стр.;
272. **Шенк Х.** Теория инженерного эксперимента. "Мир", М., 1972, 381 стр.;
273. **Шеренков И.А., Складнев М.Ф.** Применение бетонных блоков для защиты земляных откосов. //Ж. "Гидротехническое строительство", №2, М., 1971, стр. 51-54;
274. **Широков В.М.** Формирование берегов и ложа крупных водохранилищ Сибири. "Наука", Новосибирск, 1974, 172 стр.;
275. **Ширямов В.А.** К вопросу о переработке береговых склонов водохранилищ, Труды Института геологических наук, вып. 23, сер. "Инженерная геология", №2, изд-во АН СССР, 1940;
276. **Шишов Н.Д.** К вопросу о расчете элементов ветровых волн на ограниченной глубине. //Ж. "Метеорология и гидрология", №1, 1949.

Фотоальбом

Самые высокие плотины Мира



Нурекская, Таджикистан, Н = 300 м



Гранд-Диксон, Швейцария, Н = 284 м



Ингурская, Грузия, Н = 271,5 м



Вайонт, Италия, Н = 261 м



Мика, Канада, Н = 243 м



Саяно-Шушенская, Россия, Н = 242 м



Эрган, Китай, Н = 240 м



Эль-Кахон, Гондурас, Н = 234 м



Черкейская, Россия, Н = 232,5 м



Оровилл, США, Н = 223 м



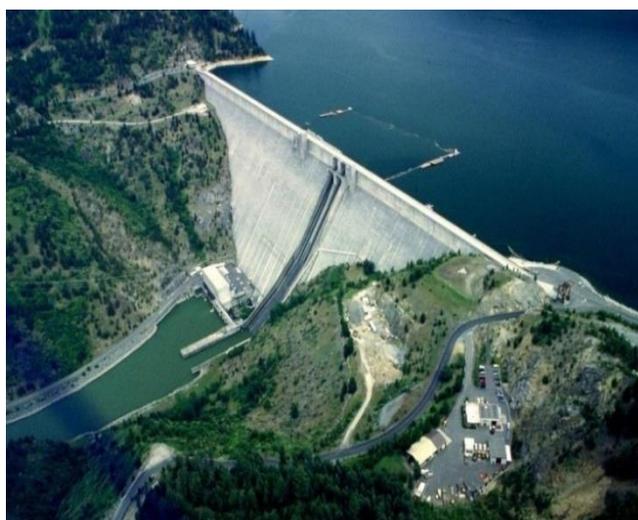
Бхакра, Индия, Н = 226 м



Гувер, США, Н = 221 м



Вераска, Швейцария, Н = 220 м



Дворжак (США), Н = 219 м



Токтогул, Кыргызстан, Н = 215 м

Водохранилища Грузии



Ингурское (Джварское) водохранилище,
Н = 230,0 м



Ингурская плотина, Н = 271,0 м



Жинвальское водохранилище, Н = 98,0 м



Жинвальская плотина, Н = 102,0 м



Сионское водохранилище, Н = 68,6 м



Сионская плотина, Н = 86,0 м



Храмское водохранилище, Н = 25,0 м



Храмское водохранилище, Н = 25,0 м



Тбилисское водохранилище
(Тбилисское море), Н = 35,0 м



Тбилисское водохранилище
(Тбилисское море), Н = 35,0 м



Водохранилище Далис-мта, Н = 38,0 м



Ткибульское водохранилище, Н = 32,0 м



Варцихское водохранилище, Н = 8,0 м



Шаорское водохранилище, Н = 12,3 м



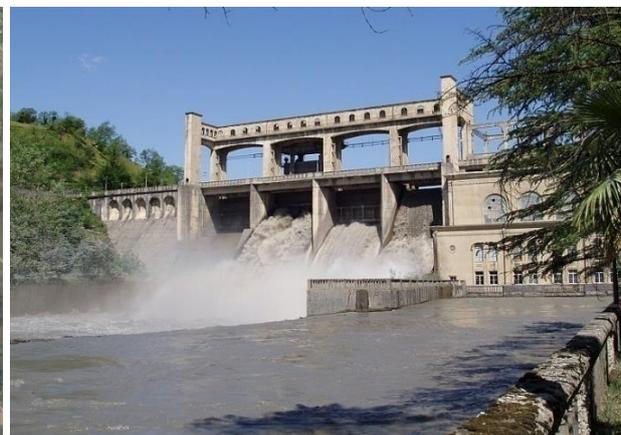
Ладжанурское водохранилище, Н = 67,8 м



Алгетское водохранилище, Н = 65,0 м



Кухское водохранилище, Н = 19,4 м



Гуматское водохранилище, Н = 30,0 м



**Водохранилище Ортагачальской ГЭС,
Н = 23,0 м**



**Водохранилище Земо-Авчальской ГЭС,
Н = 12,0 м**



Якублойское водохранилище, Н = 11,0 м



Кумисское водохранилище, Н = 4,7 м

საქართველოს განათლების, მეცნიერებისა და ახალგაზრდობის სამინისტრო
შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ცოტნე მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი

კონსტანტინე იორდანიშვილი, ირინა იორდანიშვილი,
ინგა ირემაშვილი, მარინე მღებრიშვილი,
ნოდარ კანდელაკი

მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების საინჟინრო - ეკოლოგიური
პრობლემების თავისებურებანი

მონოგრაფიაში განხილულია საქართველოს მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების ჰიდროლოგიურ-ტექნიკური მაჩვენებლები და ჰიდროლოგიურ-ეკოლოგიური მახასიათებლების საპროგნოზო გაანგარიშებების თავისებურებანი. მოყვანილია სტატისტიკური მასალა, რომელიც შესრულებულია საქართველოს მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავებზე ბოლო წლების მანძილზე ავტორების მიერ ჩატარებული დაკვირვებების, შესწავლისა და მიღებული შედეგების გაანალიზების და განზოგადების საფუძველზე. განხილულია წყალსაცავების აგების აუცილებლობის, მათი სახალხო მეურნეობაში გამოყენებისა და გარემოზე ზემოქმედების საკითხები. დაზუსტებულია წყალსაცავების კლასიფიკაცია, შეფასებულია მათი წყლის ხარისხი, ეკონომიკური და სოციალური მნიშვნელობა.

ნაშრომი განკუთვნილია ახალგაზრდა მეცნიერების, საინჟინრო-ტექნიკური დარგის მუშაკებისა და ჰიდროტექნიკოსებისათვის.

მონოგრაფიის გამოცემა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით (საგრანტო პროექტი №FR-21-2942).

მონოგრაფია დამტკიცებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო-სასწავლო მეთოდური ლიტერატურის სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს მიერ 2025 წლის 19 სექტემბერს (სხდომის ოქმი №8).

საგრანტო პროექტის ხელმძღვანელი – კონსტანტინე იორდანიშვილი, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი

სამეცნიერო რედაქტორი – გივი გავარდაშვილი, საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის აკადემიკოსი, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

რეცენზენტები:

პაატა ტულუში – შპს „ჰიდრო-2020“-ის დირექტორი, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი

ლატავრა ჯავახიშვილი – სს „საქწყალპროექტის“ მთავარი სპეციალისტი, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი

გამომცემლობა „საჩინო“

თბილისი

2025



Константин Иорданишвили

Кандидат технических наук; научный сотрудник отдела проектирования и экспертизы мелиоративных систем Института водного хозяйства им. Ц. Е. Мирцхулава Грузинского технического университета; автор/ соавтор более 40 научных статей и 8 монографий, посвященных оросительной мелиорации и использования водных ресурсов Грузии; руководитель / главный исполнитель ряда научных грантов Национального научного фонда им. Ш. Руставели.



Ирина Иорданишвили

Доктор технических наук; главный научный сотрудник; руководитель отдела водохранилищ и моря Института водного хозяйства им. Ц.Е. Мирцхулава Грузинского технического университета; автор более 120 научных статей и 8 монографий; руководитель исследований и научных работ, посвященных изучению горных водохранилищ и Черного моря; руководитель ряда научных грантов Национального научного фонда Грузии им. Ш. Руставели.



Инга Иремашвили

Кандидат технических наук, профессор, заместитель директора Института водного хозяйства им. Ц.Е. Мирцхулава Грузинского технического университета; автор/соавтор до 160 научных работ, в том числе – 15 учебных пособий, 17 монографии, 1 методического указания, 5 профессиональных стандартов, 4 учебно-просветительных программ и 3 учебных элементов модульных систем; руководитель/ главный исполнитель грантов при финансовой поддержке Национального научного фонда Грузии им. Шота Руставели.



Марине Мгебришвили

Кандидат технических наук, учёный секретарь Учёного совета Института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, главный научный сотрудник института, автор около 20 научных работ, главный исполнитель 3 грантов, финансируемых Национальным научным фондом Грузии имени Шота Руставели.



Нодар Канделаки

Академический доктор технических наук, автор/соавтор до 30 научных работ, в том числе 3 монографии; руководитель/главный исполнитель 2 грантов при финансовой поддержке Национального научного фонда Грузии им. Шота Руставели; инженер-консультант Фонда муниципального развития Грузии. Советник технического директора «Мелиорация Грузии».