

УДК 574

**УСТОЙЧИВОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ:  
РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ**

**Международный научный сборник**

В сборнике освещены региональные аспекты устойчивого экологического развития. Особое внимание уделено методологическим и практическим вопросам расчета интегрированных рисков потенциально опасных объектов техносферы, экологического аудита, энергосбережения, депонирующей способности лесов, совершенствования системы управления обращением с отходами потребления и другим разделам экологической экономики.

Сборник предназначен менеджерам и работникам государственной службы, а также аспирантам и студентам.

Редакционная коллегия:

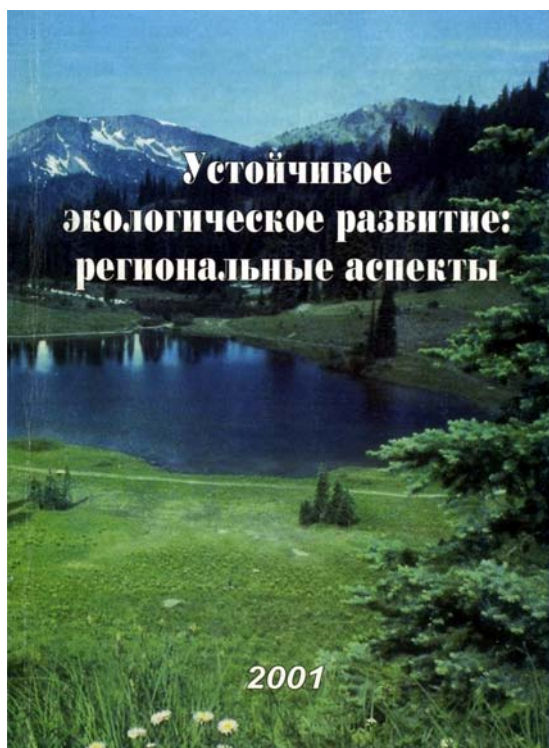
д.т.н., профессор, академик РЭА А.И. Попов (отв. редактор),  
д.т.н., член-корр. РЭА А.М. Козлитин (зам.отв. редактора),  
д.э.н., профессор Б. Поскробко (Польша),  
д.т.н., профессор, член-корр. РЭА В.А. Хрусталева,  
к.э.н., доцент И.Б. Николаева,  
И.Г. Коптева (секретарь)

Одобрено

редакционно-издательским советом  
Саратовского государственного технического университета,  
Президиумом Саратовского регионального отделения  
Российской экологической академии

© Саратовский государственный  
технический университет, 2001

© Саратовское региональное  
отделение Российской  
экологической академии, 2001



ISBN 5-7433-0871-3

**Содержание**

.....

Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.  
Анализ методик оценки последствий взрывов на потенциально опасных объектах техносферы ..... 34

.....

Козлитин А.М., Попов А.И., Хрусталева В.А., Шереметьев Е.А., Богуш Б.Б., Козлитин П.А.  
Детерминированные методы количественной оценки экологической опасности аварий на гидротехнических сооружениях ..... 69

.....

Козлитин А.М., Попов А.И., Богуш Б.Б., Козлитин П.А.  
Математические модели и методы количественной оценки экологического и интегрированного риска аварий гидротехнических сооружений ..... 83

.....

Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.  
Стохастические модели и результаты количественной оценки интегрированного риска аварий на магистральном трубопроводном транспорте в условиях Заполярья ..... 125

.....

Яковлев Б.Н., Козлитин А.М.  
Анализ состояния воздушной среды канализационных очистных сооружений на предприятиях нефтеперерабатывающей промышленности ..... 139

.....

Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.  
Математические модели и методы детерминированной оценки последствий аварий на магистральном надземном трубопроводном транспорте в условиях Заполярья ..... 157

[www://risk-2005.narod.ru/](http://www://risk-2005.narod.ru/)

[kammov@gmail.com](mailto:kammov@gmail.com)

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА АВАРИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Козлитин А.М., Попов А.И., Богуш Б.Б., Козлитин П.А.

В районах расположения водных объектов, имеющих гидротехнические сооружения (плотины, дамбы и др.), всегда существует вероятность их разрушения в силу различных причин, связанных с возможными воздействиями или отказами подсистемы «плотина-основание». Основными причинами могут быть стихийные бедствия (землетрясения, оползни, катастрофические паводки, выше расчетной величины), просчеты, допущенные в период изысканий, проектирования, отступления при строительстве, ошибки при эксплуатации, естественное старение гидросооружения, диверсионно-террористические акты и другое. По оценкам специалистов (д.т.н. Э.С. Калустян [1]) уровень годовой интенсивности отказов бетонных плотин с учетом фактической наработки на отказ составляет: по разрушению –  $0,34 \times 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>, а по повреждению –  $0,45 \times 10^{-3}$  год<sup>-1</sup>.

Частоты возникновения возможных внешних воздействий варьируются от  $10^{-4}$  до  $10^{-8}$  год<sup>-1</sup> и определяются эколого-геоморфологическими, сейсмическими, климатическими и антропогенными особенностями региона [2,3,4,5].

В табл.1 приведены данные распределения 240 аварий бетонных плотин вследствие внешних воздействий по уровням значимости [6,7].

Таблица 1  
Распределение аварий бетонных плотин вследствие внешних воздействий  
(по данным стран-членов SIGB [6] и д.т.н. Э.С. Калустян [7])

Внешнее воздействие	Всего отказов	%	В том числе разрушений	%
Давление воды при заполнении водохранилища	186	78%	8	45%
Чрезвычайные паводки	34	14%	7	39%
Сейсмические воздействия	10	4%	2	11%
Другие (температурные, заиления и др.)	10	4%	1	5%
Всего	240	100%	18	100%

Так как различные внешние силовые воздействия на плотины и дамбы имеют независимую природу проявления во время эксплуатации сооружения, поэтому при оценке риска прорыва плотины гидроузлов в пределах расчетно-

Анатолий Мефодьевич Козлитин – д.т.н., член-корр. РЭА, Саратовский государственный технический университет; Анатолий Иванович Попов – д.т.н., профессор, академик РЭА, президент Саратовского регионального отделения РЭА; Борис Борисович Богуш – директор филиала РАО «ЕЭС России», Саратовская ГЭС; Павел Анатольевич Козлитин – к.т.н., Саратовский филиал Военного артиллерийского университета.

го периода времени эксплуатации сооружения эти воздействия анализировались отдельно.

Остановимся более подробно на методах количественной оценки интегрированного риска аварий на примере гидротехнического сооружения (плотины) Волжского каскада ГЭС.

Частоты событий прорыва плотины рассматриваемого гидроузла получены на основе анализа сценариев развития возможных аварий на конкретной ГЭС, разработанных авторами и подробно описанных в статье данного сборника.\*

Граничная выборка сценариев возможных аварий катастрофического типа с прорывом плотины ГЭС приведена в табл.2.

Таблица 2

Вероятные сценарии и частоты возможного прорыва плотины гидроузла

№ сценария	Характеристика сценария	Частота реализация сценария, 1/год
5 "А"	Совмещение случайных независимых событий: паводка с обеспеченностью 0,01% и катастрофического оползня правого берега р. Волга с попаданием в водохранилище не менее 30 млн.м <sup>3</sup> грунта с последующим «забитием» грунтом большей части водосбросов гидроузла. Перелив воды через гребень плотины с последующим разрушением русловой ее части вследствие недостаточной пропускной способности водосбросов.	$8,3 \times 10^{-8}$
5 "Б"	Совмещение случайных независимых событий: катастрофического паводка с обеспеченностью 0,01% и аварийного прорыва плотины верхнего бьефа. Перелив воды через гребень левобережной дамбы, при набегающей волне прорыва гидроузла верхнего бьефа высотой 25 м, с последующим ее размывом.	$7 \times 10^{-8}$
5 "В"	Совмещение случайных независимых событий: размыва части основания русловой плотины вследствие фильтрации воды через тело плотины и антропогенных тектонических подвижек в месте провисания русловой плотины. Как следствие неравномерная осадка тела плотины с образованием трещин на всю ее высоту с последующим катастрофическим размывом и образованием прорана.	$4,38 \times 10^{-7}$
6	Реализация террористического акта с взрывом русловой части плотины	$10^{-4}$

Для оценки ожидаемого ущерба от возможного прорыва плотины ГЭС параметры волны прорыва, полученные для середины русла реки, были пересчитаны на расположенную, на расстоянии  $R_i$  от русла реки территорию каждого населенного пункта, попадающего в зону возможного затопления.

При этом определялись высота затопления  $h_{зат}$  и наибольшая скорость потока  $V_{зат}$  через территорию населенного пункта с учетом изменения релье-

\* Козлитин А.М., Хрусталеv В.А., Попов А.И., Шереметьев Е.А., Богуш Б.Б., Козлитин П.А. Детерминированные методы количественной оценки опасностей гидротехнических сооружений.

фа местности в рассматриваемых створах по мере удаления ( $R_i$ ) от середины русла реки (рис.1).

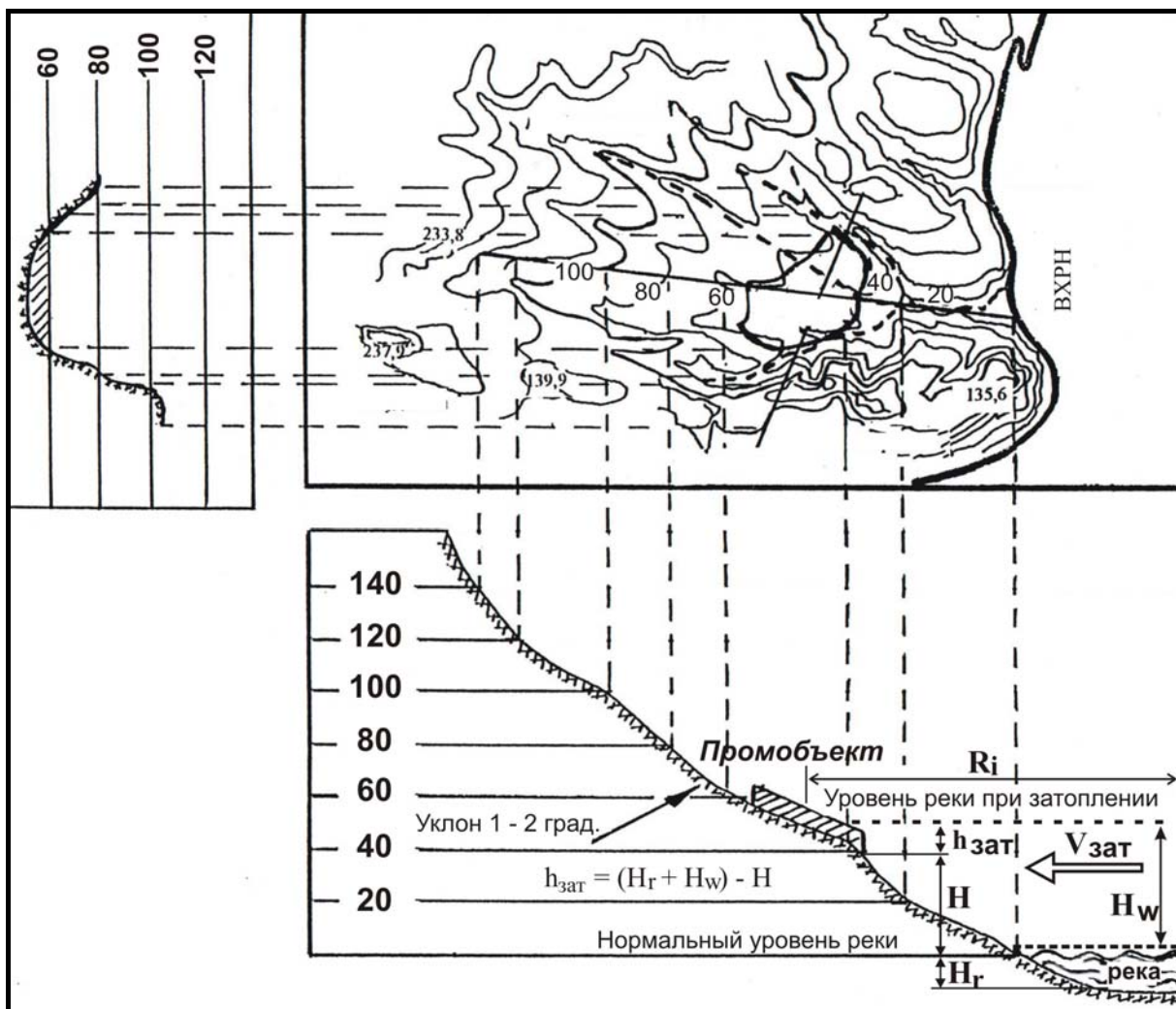


Рис.1. Последовательность оценки параметров катастрофического затопления  $h_{зат}$  и  $V_{зат}$  с учетом изменения рельефа местности в рассматриваемом створе на удалении  $R_i$  от середины русла реки

Результаты пересчета параметров волны прорыва применительно к территории населенных пунктов (на примере левобережных поселков «N-ск 8», «N-ск 9» и «N-ск 10») приведены в табл. 3- табл.5.

Таблица 3

Параметры волны прорыва на территории населенного пункта «N-ск 8»

Параметры волны прорыва в створе рассматриваемого населенного пункта			
Максимальная абсолютная глубина затопления в рассматриваемом створе $H_0$ , м	29.16	Скорость потока волны прорыва в среднем течении реки $V_w$ , м/с	1.61
Абсолютный уровень реки $H_r$ , м	21,76	Высота волны прорыва в среднем течении реки $H_w$ , м	7.40
Расстояние от плотины, км	45.4	Затопление берега в рассматриваемом сечении $R_0$ , м	4314.0
Номер сечения на карте	13	Доля затопленной территории населенного пункта, %	100

Характеристики затопления местности в пределах территории рассматриваемого населенного пункта					
Удаление рассматриваемой точки населенного пункта от русла реки, м	Коэффициент смещения населенного пункта от русла реки	Доля затопленной территории, %	Абсолютная высота рельефа местности, м	Глубина затопления, м	Скорость течения потока воды через территорию населенного пункта, м/с
2600	0.89	0	23.53	5.63	1.43
2690	0.86	10	23.83	5.33	1.38
2780	0.82	20	24.12	5.04	1.33
2870	0.79	30	24.42	4.74	1.28
2960	0.76	40	24.71	4.45	1.22
3050	0.73	50	25.01	4.15	1.17
3140	0.70	60	25.31	3.05	1.12
3230	0.66	70	25.60	3.56	1.07
3320	0.63	80	25.90	3.26	1.02
3410	0.60	90	26.19	2.97	0.97
3500	0.56	100	26.49	2.67	0.90

Таблица 4

Параметры волны прорыва на территории населенного пункта «N-ск 9»

Параметры волны прорыва в створе рассматриваемого населенного пункта					
Максимальная абсолютная глубина затопления в рассматриваемом створе $H_0$ , м	30.64	Скорость потока волны прорыва в среднем течении реки $V_w$ , м/с	2.59		
Абсолютный уровень реки $H_r$ , м	21,76	Высота волны прорыва в среднем течении реки $H_w$ , м	8.88		
Расстояние от плотины, км	47.6	Затопление берега в рассматриваемом сечении $R_0$ , м	5051.0		
Номер сечения на карте	14	Доля затопленной территории населенного пункта, %	100		
Характеристики затопления местности в пределах территории рассматриваемого населенного пункта					
Удаление рассматриваемой точки населенного пункта от русла реки, м	Коэффициент смещения населенного пункта от русла реки	Доля затопленной территории, %	Абсолютная высота рельефа местности, м	Глубина затопления, м	Скорость течения потока воды через территорию населенного пункта, м/с
3100	0.82	0	24.60	6.04	2.13
3190	0.80	10	24.88	5.76	2.07
3280	0.77	20	25.16	5.40	2.00
3370	0.75	30	25.44	5.20	1.94
3460	0.72	40	25.72	4.92	1.87
3550	0.70	50	26.00	4.64	1.81
3640	0.67	60	26.27	4.37	1.74
3730	0.65	70	26.55	4.09	1.68
3820	0.62	80	26.83	3.81	1.61
3910	0.60	90	27.11	3.53	1.55
4000	0.56	100	27.39	3.25	1.46

Таблица 5

Параметры волны прорыва на территории населенного пункта «N-ск 10»

Параметры волны прорыва в створе рассматриваемого населенного пункта			
Максимальная абсолютная глубина затопления в рассматриваемом створе $H_0$ , м	30.50	Скорость потока волны прорыва в среднем течении реки $V_w$ , м/с	2.49
Абсолютный уровень реки $H_r$ , м	21,76	Высота волны прорыва в среднем течении реки $H_w$ , м	8.74

Расстояние от плотины, км	49.3	Затопление берега в рассматриваемом сечении $R_0$ , м	3708.0		
Номер сечения на карте	15	Доля затопленной территории населенного пункта, %	73		
Характеристики затопления местности в пределах территории рассматриваемого населенного пункта					
Удаление рассматриваемой точки населенного пункта от русла реки, м	Коэффициент смещения населенного пункта от русла реки	Доля затопленной территории, %	Абсолютная высота рельефа местности, м	Глубина затопления, м	Скорость течения потока воды через территорию населенного пункта, м/с
2900	0.51	0	27.68	2.82	1.28
3010	0.47	10	28.07	2.43	1.16
3120	0.42	20	28.45	2.05	1.04
3230	0.36	30	28.83	1.67	0.90
3340	0.28	40	29.22	1.28	0.71
3450	0.20	50	29.60	0.90	0.51
3560	0.12	60	29.99	0.51	0.29
3670	0.03	70	30.37	0.13	0.07

Используя данные табл. 3 – табл. 5 о количественных характеристиках волны прорыва, дошедшей до рассматриваемого населенного пункта, было проведено зонирование территории населенных пунктов с учетом рельефа местности и удаленности от середины русла реки. В качестве критериев, определяющих границы зон катастрофического затопления, рассматривались:

$h_{зат}$  – высота волны прорыва в рассматриваемой точке поперечного разреза населенного пункта;

$V_{зат}$  – скорость потока воды в рассматриваемой точке;

$\tau_M$  – длительность затопления рассматриваемой территории до полного спада воды ниже нулевой отметки.

Характер распределения населения и территории сельских населенных пунктов по зонам катастрофического затопления, приведен в табл.6 и табл.7.

Таблица 6

Распределение территории населенных пунктов по зонам возможных разрушений при катастрофическом затоплении нижнего бьефа

№ № ПП	Населенные пункты, попадающие в зону катастрофического затопления	Площадь территории населенного пункта, попадающего в зону возможных разрушений, га			
		Зона сильных разрушений $V_{зат} > 1,5$ м/с $h_{зат} > 3,5$ м	Зона средних разрушений $V_{зат} > 1,0$ м/с $h_{зат} > 2,5$ м	Зона слабых разрушений $V_{зат} > 1$ м/с $h_{зат} > 1$ м	Зона легких разрушений $V_{зат} > 0,5$ м/с $h_{зат} > 1$ м
1	2	3	4	5	6
1	«N-ск 1» (село)	34,5	13,8	13,5	6,9
2	«N-ск 2» (село)	250,0	50,0	-	-
3	«N-ск 3» (село)	100,0	40,0	20,0	20,0
4	«N-ск 4» (село)	88,8	22,0	-	-
5	«N-ск 5» (село)	-	-	-	24,0
6	«N-ск 6» (село)	90,0	-	-	-

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5	6
7	«N-ск 7» (село)	-	-	-	-
8	«N-ск 9» (село)	30,0	90,0	30,0	-
9	«N-ск 9» (село)	100,8	11,2	-	-
10	«N-ск 10» (село)	-	7,0	7,2	21,0
Суммарная заселенная площадь		694,1	234,2	70,7	71,9

Примечание: Зонирование территории по характеру возможных разрушений выполнено для деревянных зданий, как основного типа застройки.

Таблица 7

Распределение населения по зонам возможного катастрофического затопления в случае прорыва плотины гидроузла

№№ пп	Населенные пункты с указанием берега реки, попадающие в зону катастрофического затопления	Количество людей в зонах затопления, чел.			
		Зона бурного течения >2 м/с ( $h_3 \geq 3$ м)	Зона сильного течения 1-2 м/с ( $h_3 \geq 2$ м)	Зона среднего течения 0,5-1 м/с ( $h_3 \geq 1$ м)	Зона слабого течения <0,5 м/с ( $h_3 < 1$ м)
1	2	3	4	5	6
1	«N-ск 1» (правый)	105	175	70	-
2	«N-ск 2» (правый)	-	3570	1530	-
3	«N-ск 3» (левый)	450	600	300	150
4	«N-ск 4» (левый)	-	760	-	-
5	«N-ск 5» (левый)	-	-	24	36
6	«N-ск 6» (левый)	-	610	-	-
7	«N-ск 7» (левый)	-	-	-	44
8	«N-ск 8» (левый)	-	248	62	-
9	«N-ск 9» (левый)	102	408	-	-
10	«N-ск 10» (левый)	-	60	90	60
Всего		657	6431	2075	290

Прогностическая оценка ожидаемого интегрированного ущерба и риска (*социального, материального и экологического*) от возможного катастрофического затопления территории нижнего бьефа при прорыве плотины ГЭС проводилась в соответствии с методологией количественной оценки антропогенных опасностей и риска, разработанной нами в [8].

**Материальный ущерб.** Материальный ущерб от затопления в городе связан, главным образом, с площадью, глубиной и, от части, продолжительностью затопления. Для сельского хозяйства решающее значение имеют время (сезон) и продолжительность затопления.

При оценке ожидаемого материального ущерба от затопления заселенных территорий учитывались удельная стоимость 1 га, которая составляет для заселенной сельской местности по А.Л. Рагозину [9] 1 млн. 200 тыс. руб./га, а для городов по В.А. Котляревскому [12] 0,7 – 3,4 млн. руб./га (в зависимости от численности городского населения). При этом учитывалась степень снижения капитальности зданий и сооружений в зависимости от вида разрушения (номограмма рис.2) [10;11].

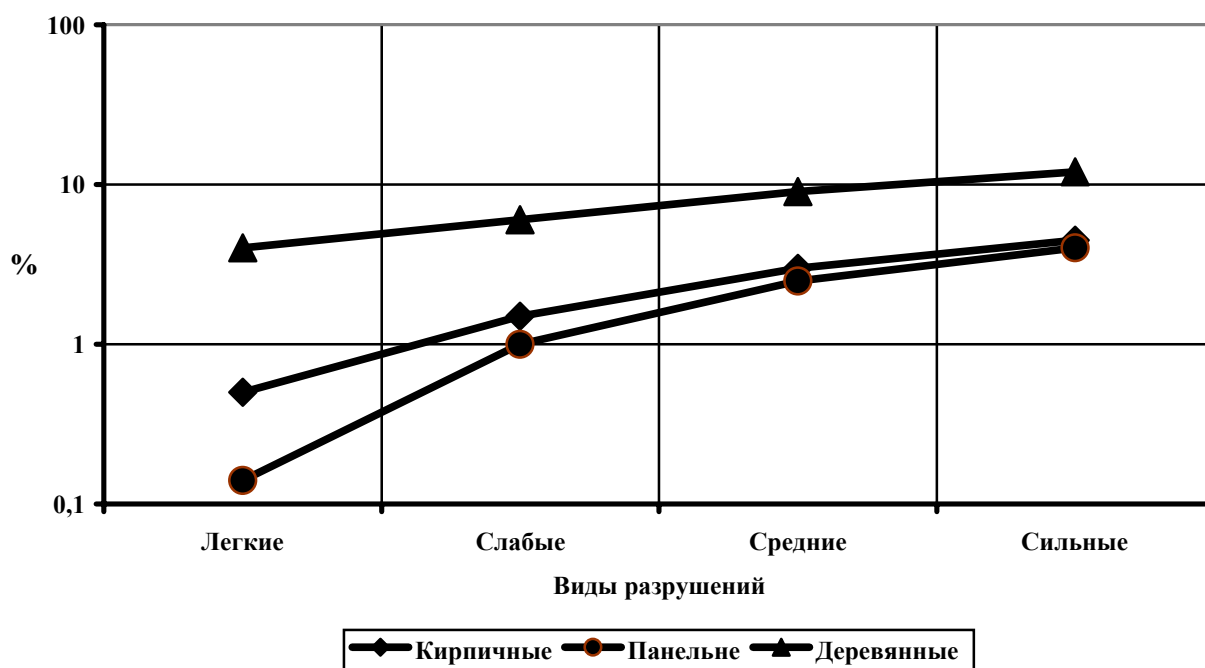


Рис.2. Номограмма снижения капитальности зданий и сооружений в зависимости от степени их разрушений при затоплении волной прорыва

При оценке ожидаемого ущерба от затопления земель, используемых в с/х производстве, исходили из нормативов стоимости сельскохозяйственных земель [20]. При оценке ожидаемого ущерба от затопления и повреждения коммуникаций (автодорог, ж/дорог, линий электропередачи и связи) использовали данные [12].

Результаты расчетов ожидаемого материального ущерба (взвешенного по вероятности потерь) при катастрофическом затоплении территории конкретной области в случае прорыва плотины ГЭС приведены в табл. 8.

Таблица 8

Прогнозируемый материальный ущерб при катастрофическом затоплении территории конкретной области в случае прорыва плотины ГЭС

№№ пп	Элементы объектов экономики промышленного региона с указанием берега реки	Математическое ожидание материального ущерба, от поражающего воздействия, млн. руб.
1	2	3
1	«N-ск 1» (правый)	7,764
2	«N-ск 2» (правый)	41,400
3	«N-ск 3» (левый)	21,120
4	«N-ск 4» (левый)	15,240
5	«N-ск 5» (левый)	1,152
6	«N-ск 6» (левый)	12,960



1	2	3
7	«N-ск 7» (левый)	-
8	«N-ск 8» (левый)	16,200
9	«N-ск 9» (левый)	15,720
10	«N-ск 10» (левый)	2,280
Суммарный материальный ущерб заселенной территории		133,826
11	Земля, используемая с сельскохозяйственным производством	55,440
12	Внутрихозяйственные дороги	132,0
13	Линии электропередач	151,2
14	Линии связи	9,0
Суммарный материальный ущерб от прорыва плотины ГЭС		189,568

**Экологический ущерб.** В статье рассмотрены вопросы расчета экологического ущерба и риска для различных случаев воздействия при аварийных ситуациях на окружающую природную среду. Основное негативное воздействие заключается в том, что бытовые и производственные отходы потоком воды будут перенесены в несанкционированные места и нанесут определенный ущерб. Наибольшее негативное воздействие оказывается для случая, когда бытовые и производственные отходы, а также различные нефтепродукты попадают в водоемы.

Базой для расчетов экологического ущерба явились количество вредных и опасных химических веществ, попадающих в водоток в зонах затопления и нормативы платы за аварийное загрязнение водоемов [13] с соответствующим рассматриваемому году коэффициентом индексации.

По имеющейся информации, складов с ядохимикатами на данной территории не имеется.

В табл.9 приведены различные варианты расчета экологического ущерба при прорыве плотины конкретной ГЭС.

Таблица 9

Экологический ущерб от прорыва плотины конкретной ГЭС

№№ п/п	Наименование показателей	Размерность	Варианты		
			I	II	III
1	2	3	4	5	6
1	Количество сброшенных в водоемы нефтепродуктов.	т	9,3	19,08	28,6
2	Норматив платы за аварийный сброс нефтепродуктов.	тыс.руб./т	89,36	89,36	89,36
3	Ущерб от сброса нефтепродуктов в водоемы.	млн.руб.	0,812	1,65	2,54
4	Количество сброшенного азота аммонийного.	т	1431,45	1908,6	2385,9
5	Норматив платы за аварийный сброс азота аммонийного.	млн.руб.	11,173	11,173	11,173
6	Ущерб от аварийного сброса азота аммонийного.	млн.руб.	15,48	21,223	26,6

1	2	3	4	5	6
7	Количество сброшенного азота нитритного.	т	28,63	381,7	477,1
8	Норматив платы за аварийный сброс азота нитритного.	тыс.руб./т	221,65	221,65	221,65
9	Ущерб от аварийного сброса азота нитритного.	млн.руб.	63,27	84,2	105,44
10	Количество сброшенных взвешенных веществ.	т	1145,16	1526,88	1908,6
11	Норматив платы за аварийный сброс взвешенных веществ.	тыс.руб./т	5,84	5,84	5,84
12	Ущерб от аварийного сброса взвешенных веществ.	млн.руб.	6,69	8,9	11,1
13	Суммарный экологический ущерб от сброса вредных веществ в водоемы.	млн.руб.	86,75	115,97	145,68

**Социальный ущерб.** При оценке ожидаемого прямого социального ущерба учитывались две его составляющие – безвозвратные и санитарные потери взвешенные по соотношению наступления случайного события – летального исхода или нанесения травм различной степени тяжести волной прорыва. При этом человеческая жизнь оценивалась в стоимостном выражении. В качестве такой величины использовалась цена спасения жизни, ЦСЖ – средневзвешенная по наиболее значимым и рисковым областям и сферам жизнедеятельности величина затрат для дополнительного спасения жизни каждого следующего индивидуума. Количественные показатели ЦСЖ обоснованы в [8]. Для определения ущерба от возможных травм различной тяжести введен взвешивающий коэффициент  $\sigma_{тр}$  сопоставляющий затраты на восстановление трудоспособности индивидуума с ценой спасения жизни. Величина  $\sigma_{тр}$  определена экспертно.

Как показано профессором В.В. Мешковым в [14], ожидаемые потери ощутимо варьируются по времени суток. Это связано с неадекватностью поведения человека в чрезвычайной ситуации в дневное и ночное время. В свою очередь доля светлого и доля темного времени суток в значительной степени зависят от времени года (рис.3), что требует детализации расчетов в пределах рассматриваемого сезона (безледоставный или зимний) с последующим суммированием средним арифметическим полученной последовательности результатов.

Обобщая сказанное, запишем выражение для оценки ожидаемого (взвешенного по вероятности поражения человека) прямого социального ущерба в стоимостном эквиваленте:

$$Y_{соц} = \sum_{l=1}^t \left[ \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n A_{lr}^* \cdot (M_{lr}^{БП} + \sigma_{тр} \cdot M_{lr}^{СП}) \cdot ЦСЖ \right] \quad (1)$$

где  $Y_{соц}$  – математическое ожидание полного социального ущерба в стоимостном выражении;  $M_{lr}^{БП}$ ;  $M_{lr}^{СП}$  – матрица потерь соответственно безвозвратных и санитарных, для  $г$ -го времени суток рассматриваемого  $l$ -го сезона (без-

ледоставный, зимний);  $A_{lr}^*$  – матрица распределения доли светлого или темного времени суток в течение рассматриваемого l-го сезона;  $\sigma_{tr}$  - коэффициент, сопоставляющий затраты на лечение и восстановление трудоспособности индивидуума с ценой спасения его жизни; ЦСЖ – цена спасения жизни индивидуума; n – количество членов арифметической суммы (степень детализации расчетов).

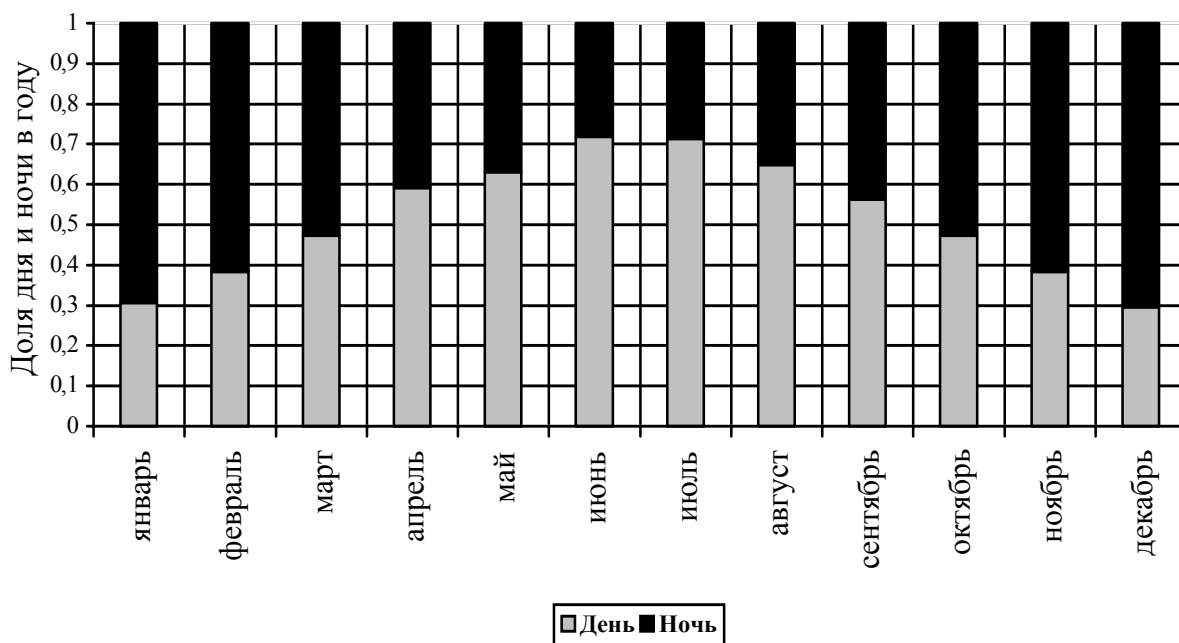


Рис.3. Характер изменения соотношения светлого и темного времени суток в течение года

Элементом матрицы потерь в уравнении (1) является математическое ожидание потерь k-ой степени тяжести, возникающих в очагах поражения при прорыве плотины гидроузла. Ожидаемые потери зависят от расположения людей по зонам катастрофического затопления, времени суток (день или ночь), времени года (безледоставный период IV-XI месяцы или зимний период XII, I-III месяцы), а также зависят от степени неадекватности действий спецслужб и населения при чрезвычайной ситуации и определяются выражением:

$$M_{ijk}(N) = \sum_{i=1}^S \beta \cdot w_j(t) \cdot P_{ik} \cdot N_{ij}; \quad j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где  $M_{ijk}(N)$  - математическое ожидание потерь k-й степени тяжести в i-й зоне катастрофического затопления j-го очага поражения (населенного пункта);  $N_{ij}$  – число людей в i-й зоне катастрофического затопления j-го очага поражения (населенного пункта);  $P_{ik}$  – вероятность нанесения человеку в i-й зоне катастрофического затопления поражения k-й степени тяжести;  $w_j(t)$  – функция, характеризующая степень неадекватности действий спецслужб и насе-

ления при ЧС в зависимости от интервала времени с момента прорыва плотины до прихода фронта волны в  $j$ -й населенный пункт;  $\beta$  - взвешивающий коэффициент, сопоставляющий степень поражения в безледоставный и зимний периоды (экспертная оценка);  $S$  - число зон катастрофического затопления, для которых определена статистическая вероятность поражения человека;  $m$  – число возможных очагов поражения людей (населенных пунктов) в нижнем бьефе водохранилища.

В уравнении (2) рассматриваются две степени тяжести поражения человека – безвозвратные потери (летальные исходы) и санитарные потери (ранения и травмы различной степени тяжести).

Вероятность нанесения человеку  $k$ -й степени поражения ( $P_{ik}$ ) определялись с помощью номограмм рис. 4. Потери на представленной номограмме даны в логарифмическом масштабе в % от числа жителей в  $i$ -ой зоне затопления.

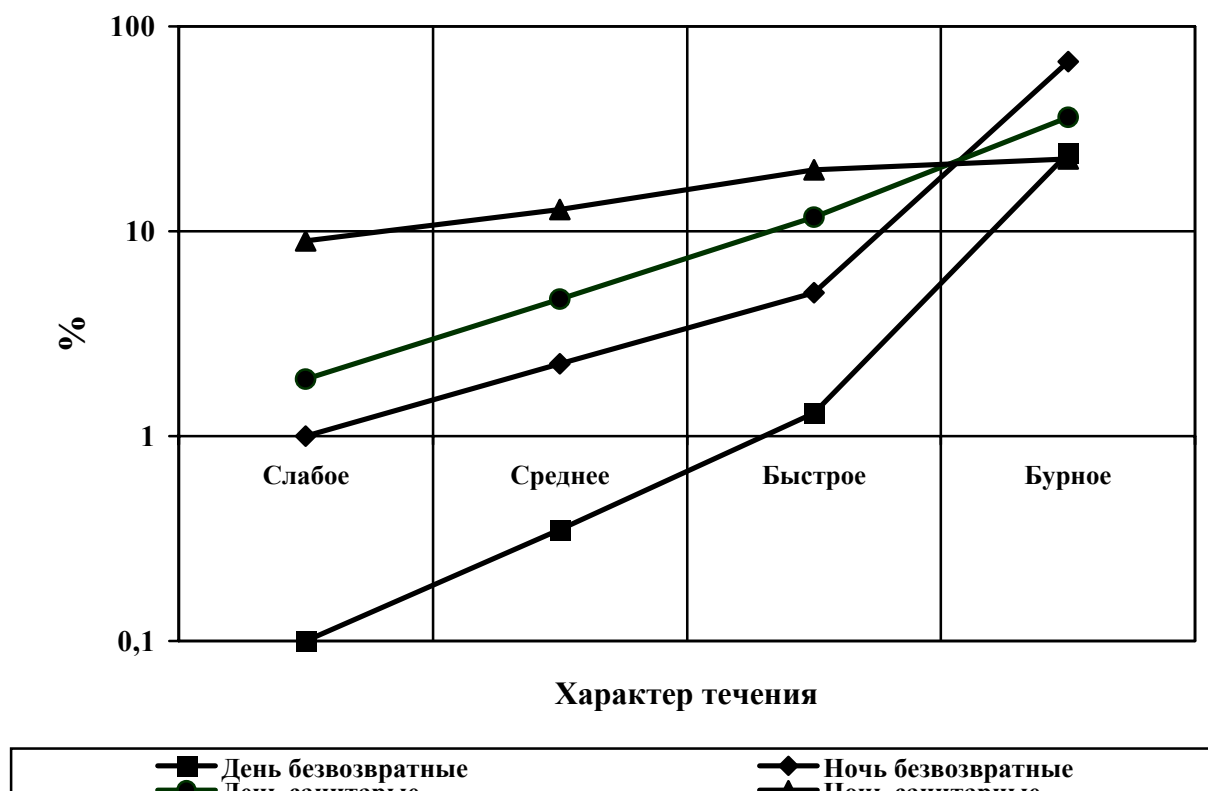


Рис.4. Номограмма распределения потерь по зонам катастрофического затопления

Данные номограммы построены на основании статистических данных о потерях в зонах катастрофического затопления, приведенных д.м.н., профессором В.В. Мешковым в монографии [14].

Прорыв плотины, являясь случайным событием, всегда происходит неожиданно не только для населения, но и для спецслужб МЧС Саратовской обл., предназначенных для проведения спасательных и других неотложных работ в очагах поражения. Поэтому структура потерь в очагах катастрофического затопления в значительной степени будет определяться и неадекватностью действий в ЧС человека. С этой целью в уравнении (2) введена функция времени  $w_j(t)$ , характеризующая степень неадекватности действий спецслужб и населения при ЧС в зависимости от интервала времени с момента прорыва плотины, до прихода фронта волны в  $j$ -й населенный пункт.

Графики функций  $w(t)$  на рис.5 построены по диаграммам Агентства по защите окружающей среды (EPA) США, для различных значений параметра  $B = 1,065 \cdot S^{0,33} \cdot \gamma^{0,4}$ , где  $S$  – площадь на которой должны проводиться мероприятия раннего оповещения, эвакуации, спасательные и другие неотложные работы ( $\text{км}^2$ ),  $\gamma$  - плотность населения в зоне проведения неотложных мероприятий (количество людей на  $\text{км}^2$ ) [12].

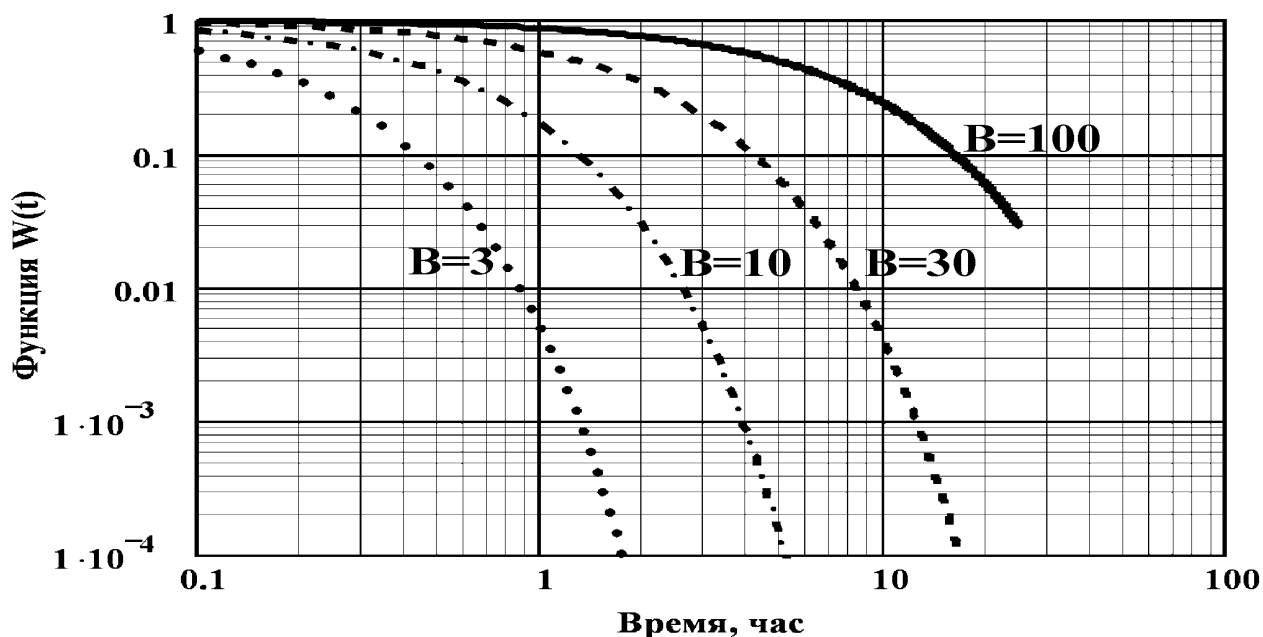


Рис.5. График функции, характеризующей степень неадекватности действий населения и служб МЧС

В условиях ЧС при отсутствии какого-либо конкретного плана действий можно предположить, что поведение населения в очаге поражения будет полностью неадекватным (консервативная оценка), т.е.  $w(t)=1$ .

Структура ожидаемых потерь для данного случая приведена в табл.10, а качественная характеристика ожидаемых потерь показана на рис. 6.

Таблица 10

Структура ожидаемых потерь в зоне катастрофического затопления в условиях **полной неадекватности** поведения населения при  $w(t)=1$

№ № пп	Населенные пункты	Время подхода фронта волны прорыва, ч	Ожидаемые потери, чел.							
			Безледоставный период (IV-XI)				Зимний период (XII, I-III)			
			День		Ночь		День		Ночь	
			Безвоз- вратные потери	Санитар- ные по- ные те- ри	Безвоз- вратные потери	Санитар- ные по- ные те- ри	Безвоз- вратные потери	Санитар- ные по- ные те- ри	Безвоз- вратные потери	Санитар- ные по- ные те- ри
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	«N-ск 1»	1,24	27,73	61,54	81,21	67,53	41,04	91,06	120,25	99,94
2	«N-ск 2»	3,87	51,76	488,84	212,93	909,08	76,60	723,74	315,14	1345,43
3	«N-ск 3»	5,08	117,0	249,0	342,0	273,0	173,16	368,52	506,16	404,04
4	«N-ск 4»	6,00	9,88	88,92	38,0	152,0	14,62	131,6	56,24	224,96
5	«N-ск 5»	7,67	0,12	1,8	0,9	6,3	0,18	2,66	1,33	9,32
6	«N-ск 6»	8,30	7,93	71,4	30,5	122,0	11,74	105,67	45,14	180,56
7	«N-ск 7»	8,82	0,044	0,84	0,44	3,96	0,065	1,24	0,65	5,86
8	«N-ск 8»	10,20	3,44	31,9	13,8	57,5	5,1	47,2	20,42	85,1
9	«N-ск 9»	10,91	29,8	84,46	89,3	104,6	44,1	125,0	132,1	154,75
10	«N-ск 10»	11,49	1,16	12,35	5,63	28,88	1,7	18,3	8,33	42,74
Суммарные потери			248,86	1091,05	814,71	1724,85	368,3	1614,75	1205,77	2552,78

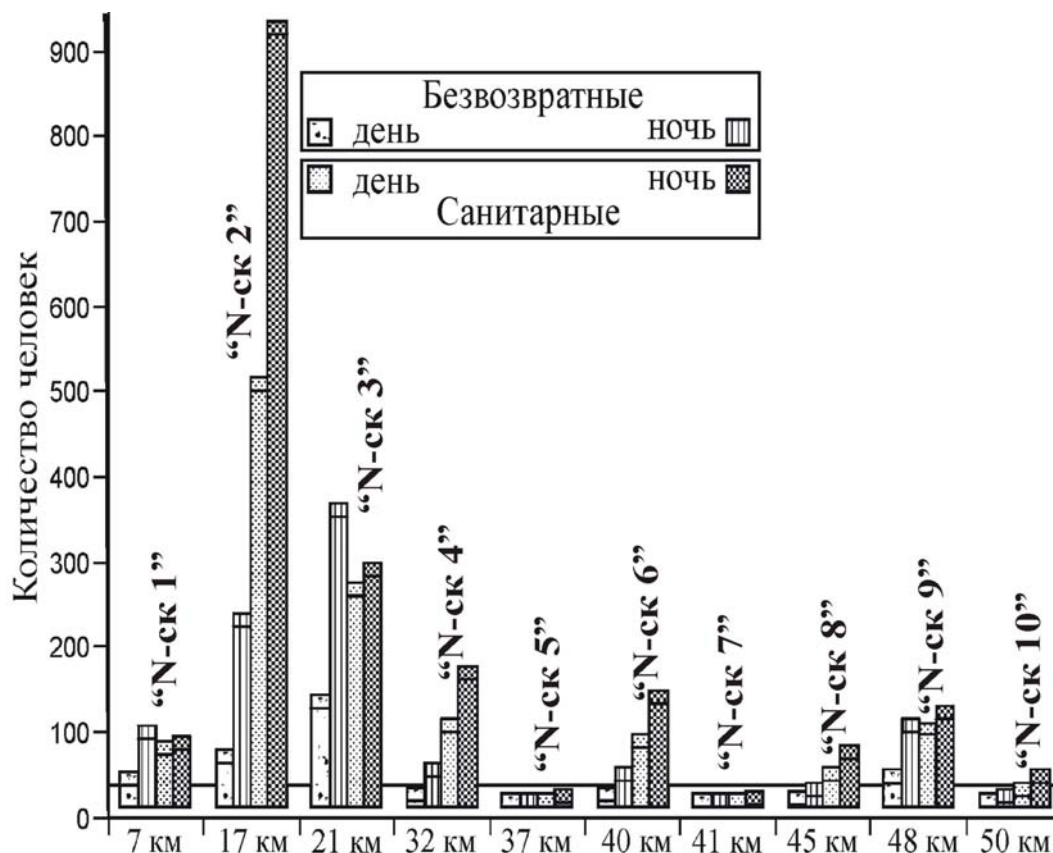


Рис. 6. Распределение ожидаемых потерь по населенным пунктам, попадающих в зону затопления

При срабатывании систем раннего оповещения и наличии планов действия в ЧС вероятность неадекватного поведения населения уменьшается, что ведет к снижению ожидаемых потерь. Структура ожидаемых потерь для этого случая показана в табл. 11.

Таблица 11

Структура ожидаемых потерь в зоне катастрофического затопления в условиях *адекватности действий* при ЧС в функции времени подхода фронта волны прорыва

№ № пп	Населенные пункты	Время подхода фронта волны прорыва, ч	Ожидаемые потери, чел.							
			Безлюдный период (IV-XI)				Зимний период (XII, I-III)			
			День		Ночь		День		Ночь	
			Безвозвратные потери	Санитарные потери	Безвозвратные потери	Санитарные потери	Безвозвратные потери	Санитарные потери	Безвозвратные потери	Санитарные потери
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	«N-ск 1»	1,24	23,2	51,5	67,9	56,5	34,3	76,1	100,5	83,6
2	«N-ск 2»	3,87	29,8	281,1	122,4	522,7	44,1	416,0	181,2	773,6
3	«N-ск 3»	5,08	56,6	120,5	165,5	132,1	83,8	178,4	244,2	195,6
4	«N-ск 4»	6,00	4,2	37,8	16,2	64,6	6,2	55,9	23,9	95,6
5	«N-ск 5»	7,67	0,04	0,603	0,302	2,1	0,06	0,89	0,446	3,1
6	«N-ск 6»	8,30	2,4	21,8	9,3	37,3	3,6	32,3	13,8	55,3
7	«N-ск 7»	8,82	0,013	0,239	0,125	1,13	0,02	0,353	0,185	1,67
8	«N-ск 8»	10,20	0,805	7,47	3,23	13,5	1,19	11,05	4,78	19,9
9	«N-ск 9»	10,91	6,3	17,8	18,8	22,1	9,3	26,4	27,9	32,7
10	«N-ск 10»	11,49	0,226	2,41	1,1	5,63	0,332	3,57	1,62	8,34
Суммарные потери			128,98	541,22	404,86	857,66	182,9	800,96	599,23	1269,41

Как видно из рис. 6 наибольшее число безвозвратных потерь можно ожидать в *ночное время* в поселке «N-ск 3», в наименьшей степени пострадает население поселков «N-ск 5» и «N-ск 7».

Результаты расчетов ожидаемого (взвешенного по вероятности поражения человека) полного социального ущерба приведены в табл. 12.

Таблица 12

Прогнозируемый социальный ущерб при катастрофическом затоплении в случае прорыва плотины конкретной ГЭС

№№ п.п.	Наименование населенного пункта с указанием берега реки	Расстояние от гидроузла, км	Время подхода фронта волны прорыва, час	Математическое ожидание социального ущерба			
				В натуральных единицах, чел.	В стоимостном эквиваленте, млн.руб.		
					Нижний уровень ЦСЖ, 100 тыс. руб	Средний уровень ЦСЖ, 600 тыс. руб	Верхний уровень ЦСЖ, 1 млн. руб
1	2	3	4	5	6	7	8
1	«N-ск 1»	7,4	1,24	59,495	5,9	35,7	59,49
2	«N-ск 2»	16,8	3,87	135,934	13,6	81,6	135,9
3	«N-ск 3»	21,4	5,08	144,434	14,4	86,7	144,4
4	«N-ск 4»	31,8	6,00	17,882	1,8	10,730	17,880

Продолжение табл. 12

1	2	3	4	5	6	7	8
5	«N-ск 5»	37,2	7,67	0,358	0,036	0,22	0,368
6	«N-ск 6»	39,5	8,30	10,304	1,030	6,2	10,3
7	«N-ск 7»	41,2	8,82	0,161	0,02	0,1	0,2
8	«N-ск 8»	45,4	10,20	3,581	0,36	2,15	3,6
9	«N-ск 9»	47,6	10,91	17,0	1,7	10,2	17,0
10	«N-ск 10»	49,3	11,49	1,244	0,124	0,75	1,2
Суммарный социальный ущерб				390,393	39,02	234,35	390,3

Гистограмма распределения социального ущерба по населенным пунктам, попадающих в зону катастрофического затопления показана на рис. 7.

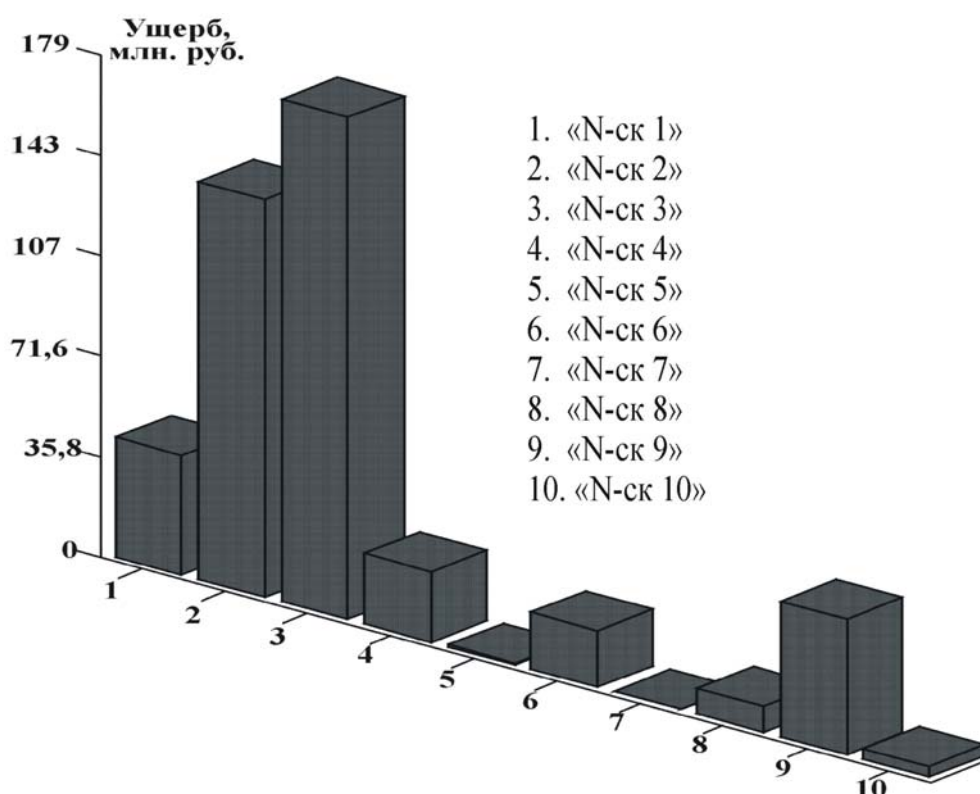


Рис. 7. Гистограмма распределения социального ущерба по населенным пунктам, попадающих в зону катастрофического затопления

Ожидаемый интегрированный ущерб, включающий составляющие социальных и материальных потерь, наносимых волной прорыва плотины гидроузла приведен в табл. 13.

Таблица 13

Интегрированный ущерб в случае прорыва плотины конкретной ГЭС

Интегрированный ущерб (млн. руб.) при цене спасения жизни индивидуума		
Нижний уровень ЦСЖ 100 тыс. руб.	Средний уровень ЦСЖ 600 тыс. руб.	Верхний уровень ЦСЖ 1 млн.руб.
344,578	539,738	695,938

Величина интегрированного риска определялась для граничной выборки сценариев с катастрофическими последствиями затопления территории



нижнего бьефа в случае прорыва плотины конкретной ГЭС и нанесения волной прорыва интегрированного ущерба, взвешенного по степени возникновения определенного уровня потерь. Значение интегрированного риска, учитывающего вероятность реализации события, приведена в табл. 14.

Таблица 14

Интегрированный риск нанесения ущерба при катастрофическом затоплении территории нижнего бьефа в случае прорыва плотины конкретной ГЭС

Показатель прогнозируемых последствий прорыва плотины гидроузла	№ сценария и частота возникновения прорыва в плотине гидроузла, 1/год	Интегрированный риск при цене спасения жизни человека в диапазоне значений		
		Нижний уровень ЦСЖ 100000 руб.	Средний уровень ЦСЖ 600000 руб.	Верхний уровень ЦСЖ 1 млн.руб.
Интегрированный риск, руб/год	№5а $8,3 \times 10^{-8}$	28,5	44,8	57,76
	№5б $7 \times 10^{-8}$	24,12	37,78	48,71
	№5в $4,38 \times 10^{-7}$	150,9	236,4	304,82
	№6 $1 \times 10^{-4}$	34457,8	53973,8	69593,8

Характер распределения потенциального риска летального исхода от воздействия на человека волны прорыва на прилегающей к плотине ГЭС территории приведен в табл. 15.

Таблица 15

Характер распределения потенциального риска по населенным пунктам, попадающим в зону катастрофического затопления

Населенные пункты Зоны затопления	Потенциальный риск, 1/год									
	«N-ск 1»	«N-ск 2»	«N-ск 3»	«N-ск 4»	«N-ск 5»	«N-ск 6»	«N-ск 7»	«N-ск 8»	«N-ск 9»	«N-ск 10»
Зона бурного течения	$3,5 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$9,8 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$	$8,2 \times 10^{-6}$
Зона сильного течения	$2,4 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$9,4 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-7}$	$6,6 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$
Зона среднего течения	$9,4 \times 10^{-7}$	$6,5 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$
Зона слабого течения	$3,9 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$9,9 \times 10^{-8}$	$9,1 \times 10^{-8}$

На диаграмме рис.8 показан характер изменения уровня потенциального риска в населенных пунктах в зависимости от расстояния до плотины ГЭС и времени добегания волны прорыва до рассматриваемого створа.

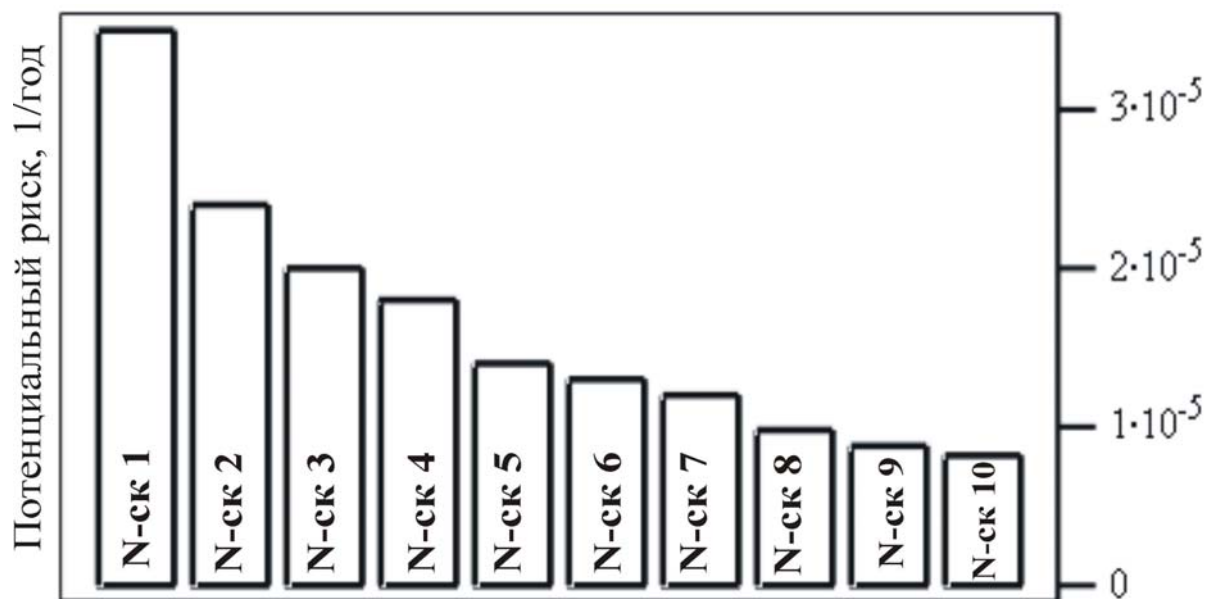


Рис.8. Распределение потенциального риска летальных исходов по населенным пунктам нижнего бьефа, попадающих в зону катастрофического затопления при прорыве ГЭС

Наряду с количественной оценкой риска социальных и материальных потерь от прорыва плотины ГЭС, рассмотрены и возможные экологические последствия спуска водохранилища.

Моделирование гидродинамики Волжского каскада ГЭС при экстремальных ситуациях, проведенное в Институте экологии Волжского бассейна РАН [15], позволило установить, что при мгновенном разрушении плотины одного из гидроузлов каскада по всему ее периметру наблюдаются два вида волн перемещения: положительная нисходящая волна, перемещающаяся вниз по течению от плотины, и отрицательная восходящая волна, перемещающаяся вверх по водохранилищу от плотины. Оценивая возможные последствия прохождения обратной волны, важно отметить, что эти последствия с точки зрения человеческих жертв и разрушений должны быть менее значительными, чем в нижнем бьефе от прохождения волны прорыва. Однако опорожнение водохранилища конкретной гидроузла Волжского каскада может вызвать ряд неблагоприятных последствий.

Прежде всего, активизируются экзогенные процессы и особенно в створах с наименьшими сечениями, лимитирующими проходные расходы воды. На этих участках возможны наибольшие разрушения берегов.

У рассматриваемого водохранилища, как и у большинства водохранилищ Волжского каскада, велика протяженность абразионных берегов с интенсивностью их отступления на отдельных участках в 5-7,5 м в год и более. Спуск водохранилища и отступление уреза воды вызовут оживление оползней, обвалов, осыпей; возможно даже возникновение пыльных бурь на обнажающихся склонах.

По материалам Института экологии Волжского бассейна РАН и Саратовского государственного университета, мощные сбросы воды в нижний бьеф конкретной ГЭС Волжского каскада могут спровоцировать местные землетрясения силой 1-2 балла в радиусе 3-4 км от плотины [16].

Эти местные очаги сейсмической активности могут при определенных условиях спровоцировать в свою очередь и более крупные землетрясения с разрушительными последствиями.

Зоны значительной активизации геоморфологических процессов, как видно из карты «Геоморфологической опасности территории Саратовско-Балаковского промышленно-энергетического узла (среднее Поволжье)», составленной С.К. Гореловым в лаборатории геоморфологии института географии РАН в 1992 г., наиболее распространены в приплотинных участках водохранилища [17].

Аварийный спуск водохранилища может привести и к возникновению экстремальных бактериологических ситуаций в результате образования застойных, «мертвых» зон на мелководьях водохранилища, общая площадь которых составляет 20% от общей площади водохранилища при НПУ. Эти зоны чрезвычайно опасны с точки зрения качества воды и санитарного состояния обнажающегося дна.

При разрушении плотины ГЭС Волжского каскада для верхнего бьефа весьма существенными могут быть не непосредственные, а косвенные потери, связанные с нарушениями водо- и электроснабжения, потерями непрерывных водных путей, вынужденной переориентацией водо- и энергоемких производств, а также потери, связанные с поступлением в нижний бьеф загрязненных вод и с необходимостью очистки ложа водохранилища от различных отложений содержащих токсичные соединения, тяжелые металлы, пестициды, нефть и другие виды органических отложений, накапливающихся на дне водоема. При этом донные отложения сорбируют токсические вещества до уровней, намного превышающих их содержание в водной толще [18].

По исследованиям, проводившимся Институтом водных проблем РАН на Волжских водохранилищах, на определенном этапе их эксплуатации в придонных слоях формируются тонкодисперсные осадки с консистенцией геля. Гелеобразные осадки, с концентрацией загрязняющих веществ на порядок превышающих ПДК, сосредотачиваются в застойных и слабопроточных зонах водохранилищ и любое воздействие на них движением воды может привести к катастрофе [19].

Таким образом, очень опасен спуск водохранилищ при аварийных ситуациях. При этом прогнозируемый прямой ущерб от материальных и социальных потерь в нижнем бьефе ГЭС Волжского каскада, составляющий 539,7 млн. руб, при риске реализации такого события  $10^{-4}$  в год, может возрасти на порядок с учетом экологических последствий, связанных с обнажением дна водохранилища при аварийном прорыве плотины.

## Заключение

Разработаны математические модели и методы количественной оценки экологического и интегрированного риска аварий на гидротехнических сооружениях. В качестве интегрированного риска рассматривается взвешенный по вероятности наступления негативных событий комплексный показатель прогнозируемого полного ущерба (социального, материального, экологического), от возможного катастрофического затопления территории нижнего бьефа при прорыве плотины ГЭС.

Впервые предложена и реализована математическая модель расчета социального риска в зонах катастрофического затопления с возможными безвозвратными и санитарными потерями среди населения. При этом человеческая жизнь оценивается в стоимостном эквиваленте.

В модель социального риска введен параметрический закон поражения человека, позволяющий оценивать вероятность нанесения человеку  $k$ -й степени поражения в зависимости от скорости потока и высоты волны прорыва с учетом времени суток, времени года, а также функции, характеризующей степень неадекватности действий людей при чрезвычайных ситуациях в момент прихода фронта волны прорыва в населенный пункт.

На основании разработанной методики проведен анализ безопасности и расчет экологического и интегрированного риска аварий в реальных конкретных условиях функционирования плотины ГЭС Волжского каскада. Результаты анализа позволили обосновать и внедрить инженерные мероприятия по снижению интегрированного риска и охране окружающей среды на наиболее опасных участках левого берега Волгоградского водохранилища.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калустян Э.С. Статистика и причины аварий плотин // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1997. Вып. 3. С. 40-50.
2. Королев-Перлишин А.Ю., Стахорский В.С., Уткин В.И., Пьянов И.И., Сидельникова Л.И. Предупреждение экологической опасности возможных аварий и катастроф в промышленности // Экология промышленного производства. 1993. Вып.4. С.3-12.
3. Эпов А.Б. Территориальные особенности возникновения техногенных аварий и катастроф // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1995. Вып. 1. С.27-32.
4. Акимов В.А., Козлов К.А. Оценка природной и техногенной опасности субъектов Приволжского региона России // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1998. Вып.7. С.64-76.
5. Малышев В.А., Гозенбурк В.А. Вопросы повышения устойчивости и обеспечения безопасности функционирования гидротехнических сооружений // ВИМИ, Гражданская оборона. 1989. Вып.8. С. 11-16.
6. Deterioration of dams and reservoirs. Balkema, 1984.

7. Калустян Э.С. Многофакторная классификация отказов скальных оснований: Тр. Гидропроекта. Сб. 150. М. 1993.

8. Козлитин А.М., Попов А.И. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы. Саратов: СГТУ, 2000. 216 с.

9. Рогозин А.Л. Оценка и картографирование опасности и риска от природных и техногенных процессов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1993. Вып. 3. С. 16-11.

10. Алексеев П.А. Стихийные явления в природе. М.: Мысль. 1988.

11. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометиздат. 1988.

12. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учеб. пособие. Кн.1. / В.А. Котляревский, К.Е. Кочетков, А.А. Носач, А.В. Забегаев и др. М.: Издательство АСВ. 1995. 320 с.

13. Экономика природопользования. Аналитические и нормативно-методические материалы. Минприроды РФ, Москва, 1994. 472 с.

14. Организация экстренной медицинской помощи населению при стихийных бедствиях и других чрезвычайных ситуациях. Под. ред. В.В. Мешкова. М.: МП «Медикас». 1992. 194с.

15. Моделирование гидродинамики Волжского каскада ГЭС.//Научно-технический отчет. Лаборатория моделирования экстремальных экологических ситуаций. - Тольятти, Ин-т экологии Волжского бассейна. 1992.

16. Экологическое прогнозирование состояния каскада Волжских водохранилищ с учетом риска возникновения техногенных катастроф. Научно-технический отчет. Тольятти. Ин-т экологии Волжского бассейна, 1992.

17. Малик Л.К., Барабанова Е.А. Возможное последствие спуска водохранилища Саратовской ГЭС.// Известие РАН. Сер. географич. 1997. №1. С.96-102.

18. Гапеева М.В. и др. Локализация и распределение тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Верхней Волги.// Водные ресурсы. 1997. №2. С. 174-180.

19. Дебольский В.К. Проблема предотвращения вторичных загрязнений водохранилищ.//Гидротехническое строительство. 1996. №11. С.46-47.

20. Нормативы стоимости сельскохозяйственных земель с учетом текущего коэффициента индексации приравниваются «Нормативам стоимости освоения новых земель взамен изымаемых сельскохозяйственных угодий для несельскохозяйственных нужд», утвержденным постановлением Совета Министров Правительства Российской Федерации от 28.01.1993 г. №77.