

Оценка рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности экстремальными наводнениями и мероприятия по их превентивной защите

Лаборатория численного гидродинамического моделирования

Беликов В.В., Борисова Н.М.

Проблема и её масштаб

Прогнозирование уровней и рисков затопления селитебных территорий является одной из важнейших задач практической гидрологии, а защита этих территорий – важная Государственная задача.



Берегозащитные сооружения на р. Хуанхэ – самые мощные в мире

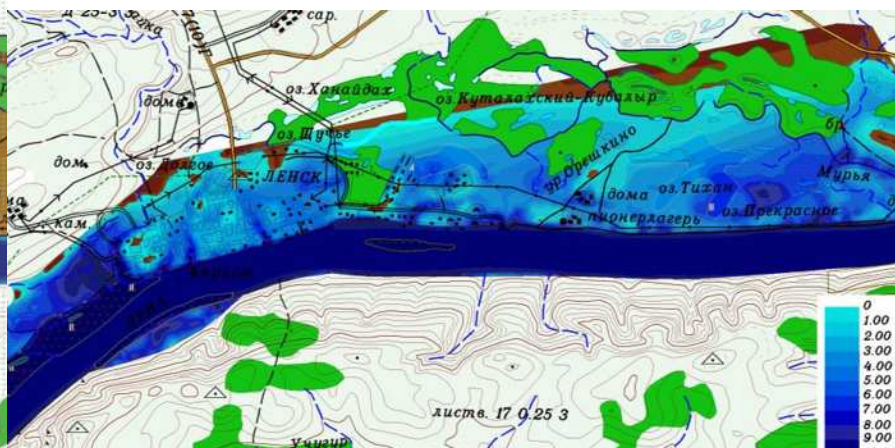
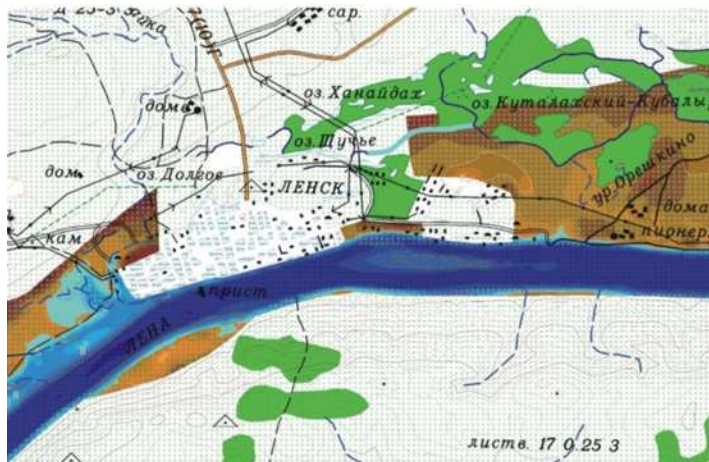
Проблема и её масштаб



Расположение строений на пойме р. Хуанхэ относительно уровня воды (музей р.Хуанхэ)



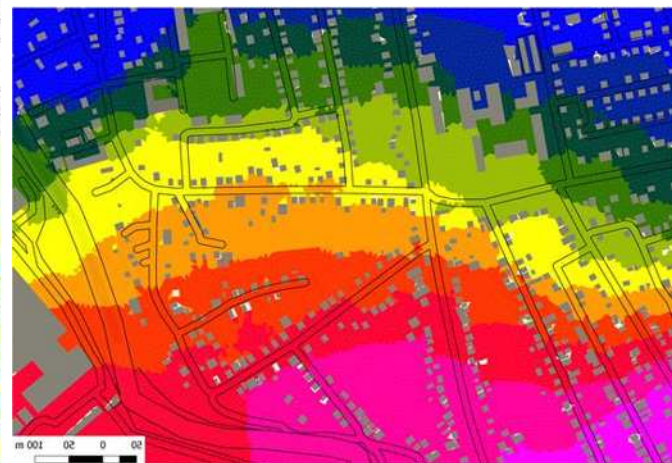
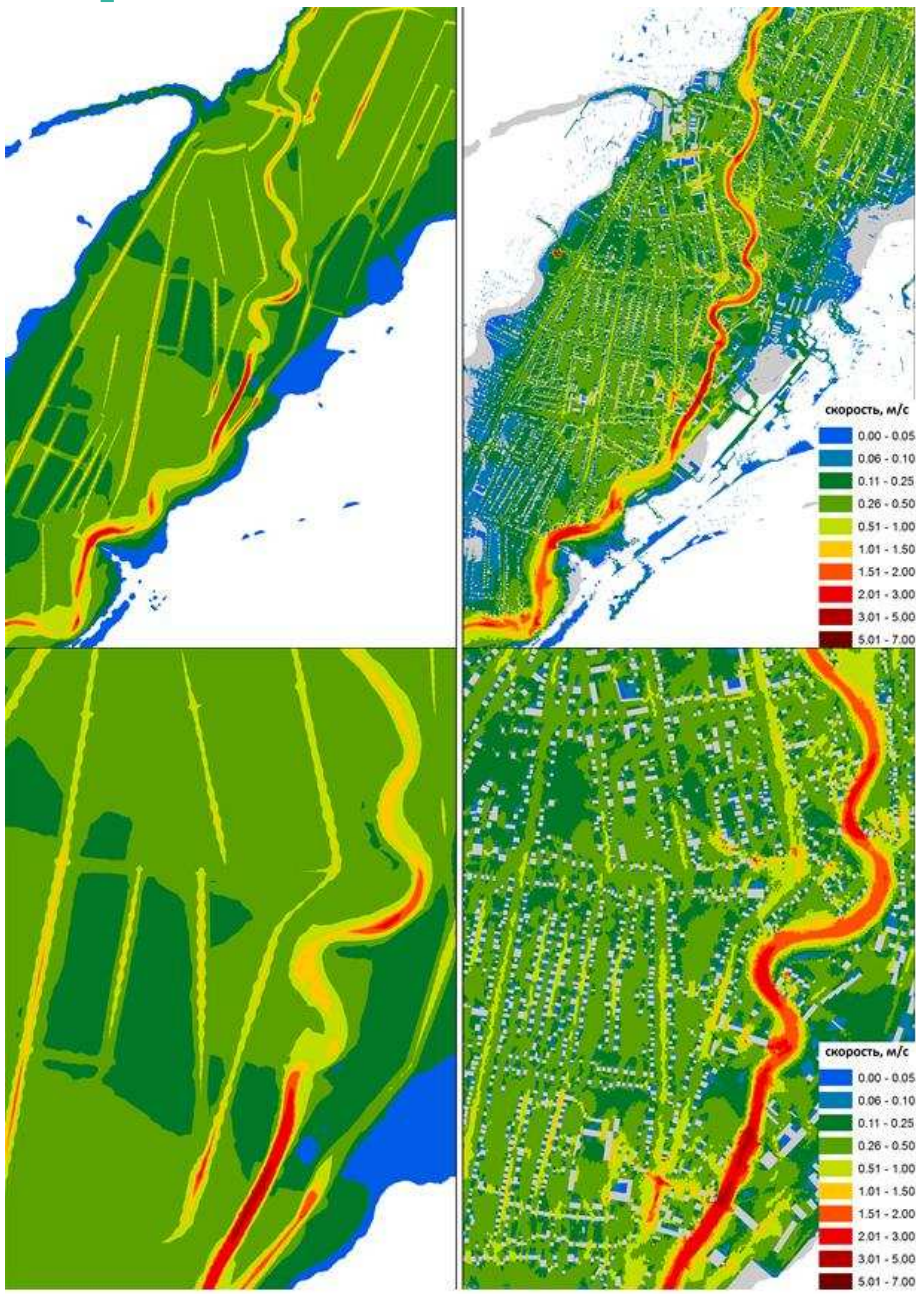
Укрепление Мылkinsкой защитной дамбы мешками с песком (г. Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2013 г.)



Затопление г. Ленск на р.Лене в заторное половодье 2001 г. Слева – глубины без учета затора льда

Проблема и её масштаб

Оценка рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности экстремальными наводнениями и мероприятиями по их превентивной защите.



Затопление г. Крымск
дождевым паводком 6-7
июля 2012 года.

Проблема и её масштаб

Оценка рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности экстремальными наводнениями и мероприятия по их превентивной защите.



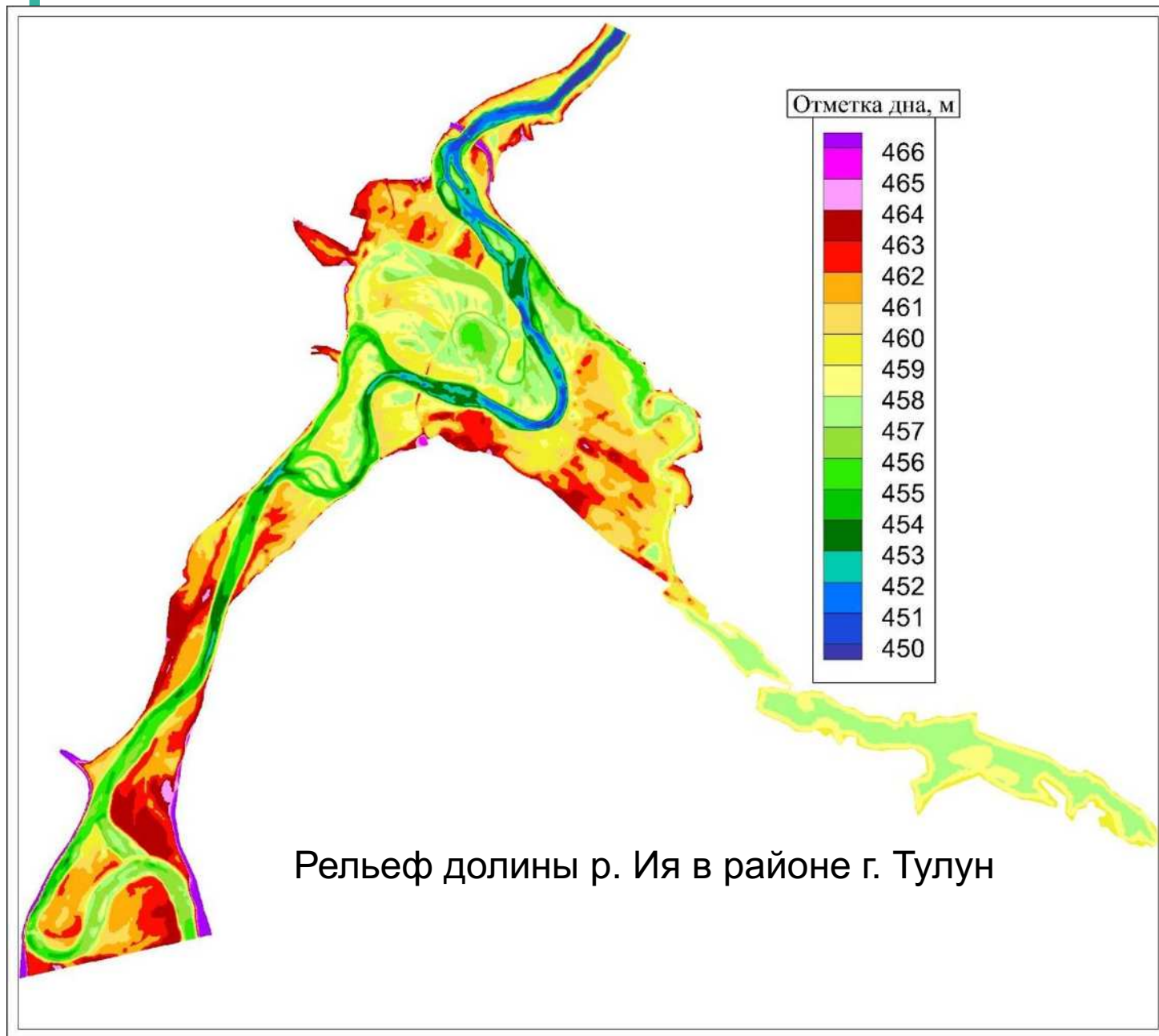
Ж/д мост на пике паводка

**Залом в подмостовом
пространстве а/д моста**



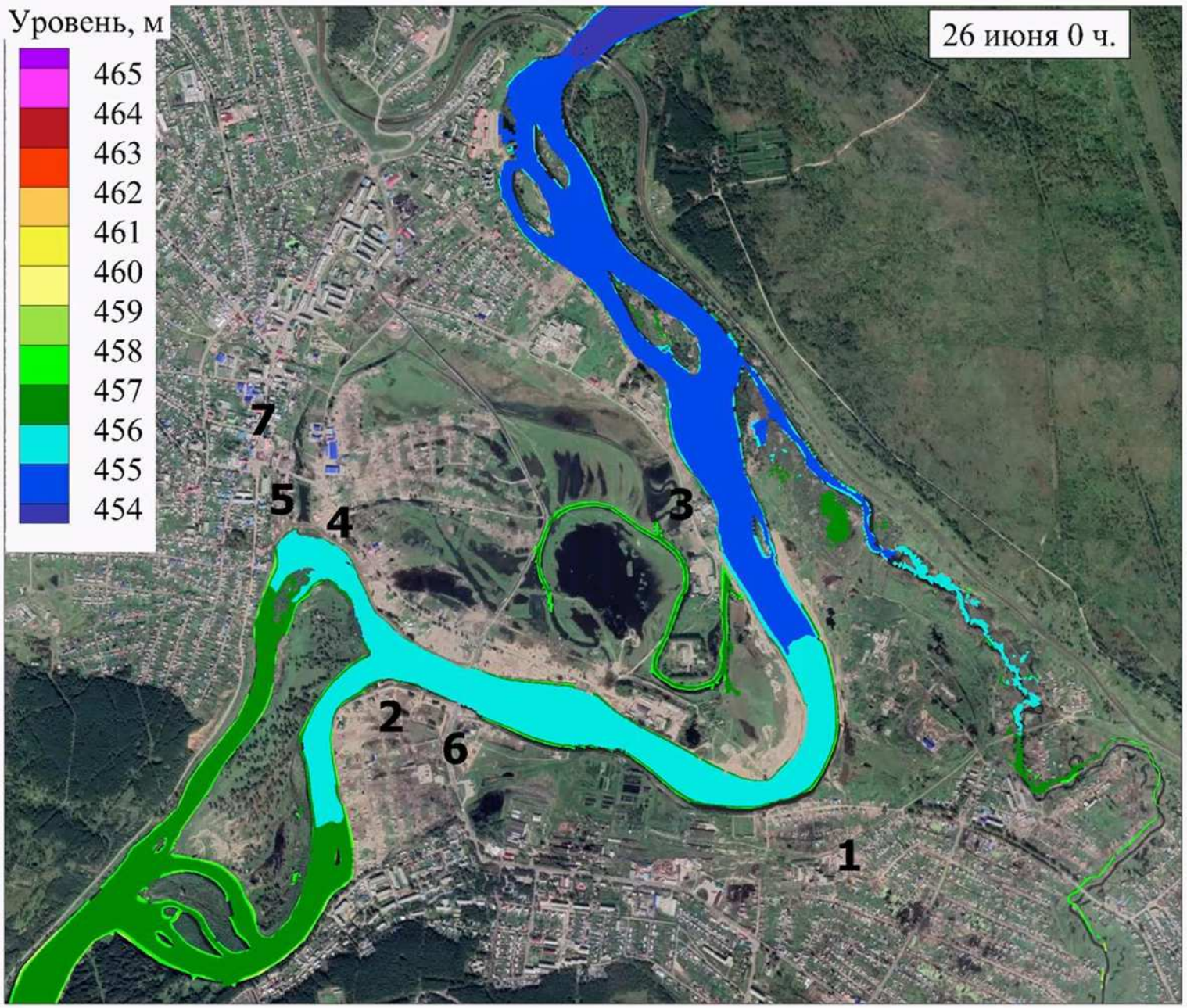
Проблема и её масштаб

Оценка рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности экстремальными наводнениями и мероприятиями по их превентивной защите.



Оценка рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности экстремальными наводнениями и мероприятия по их превентивной защите.

Проблема и её масштаб



Основные тезисы

1. Необходимость защиты селитебных территорий от затопления паводком обеспеченностью 1%, принятая в нормативных документах, **не имеет научного и практического обоснования**
2. Детальный расчет величины ущербов и рисков от затопления селитебных территорий на основе двумерных гидродинамических моделей и подробной информации о расположении, типе и стоимости всех сооружений и данных о населении в настоящее время возможен, но чрезвычайно трудоемок и затратен
3. Детальный расчет вероятного вреда и рисков неприменим в случаях освоения новых территорий в поймах рек, в то время как обеспечение их защиты от затоплений необходимо
4. Для проектирования защитных мероприятий нет необходимости знать конкретную величину ущерба и риск в стоимостном выражении, а достаточно определить высотнопланировочные отметки, обеспечивающие существенное снижение рисков по сравнению с максимально возможными значениями
5. Требуется разработка упрощенных подходов к оценке рисков затопления, основанных на зависимостях от глубины потока

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Цель исследования – разработать научно-методические основы приближенной оценки риска затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности природными и техногенными паводками

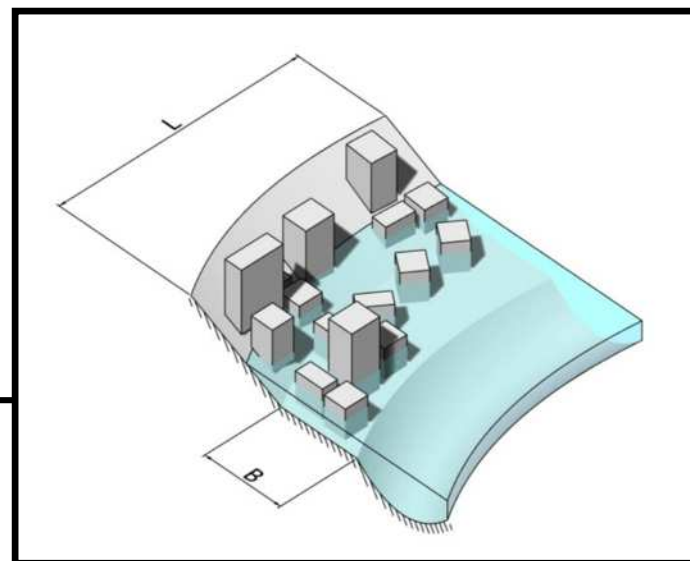
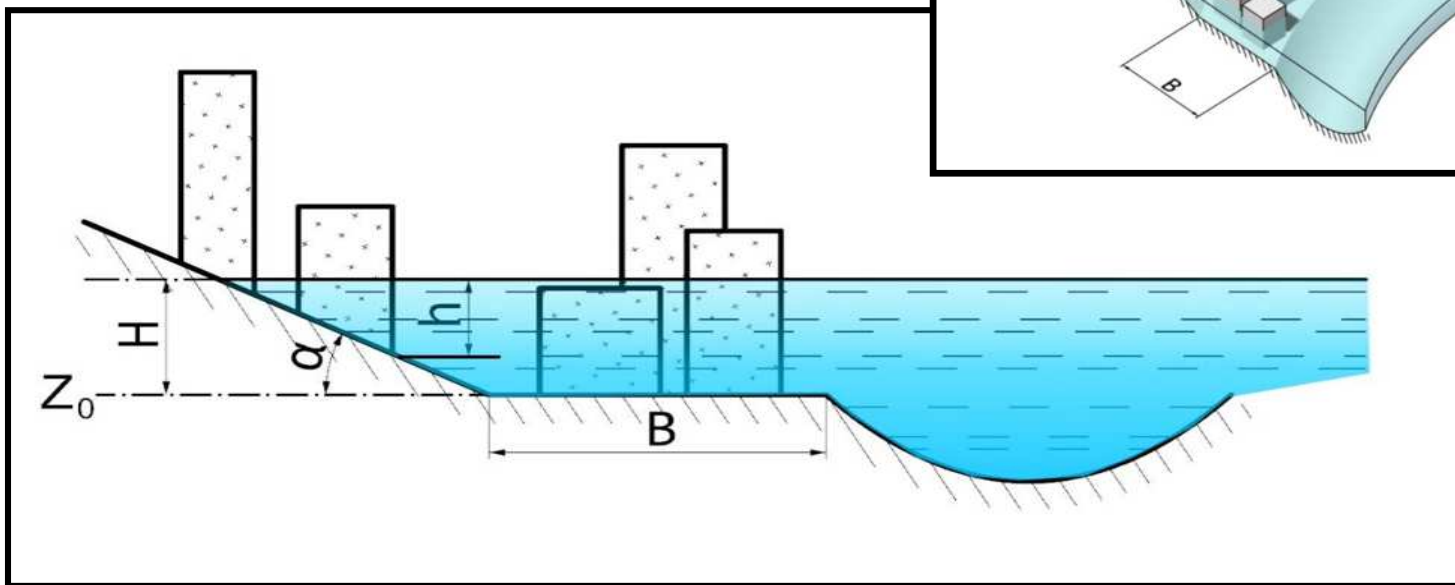
Задачи исследования

- Построение приближенной зависимости величины ущерба от глубины затопления
- Выбор способа аппроксимации кривой вероятности достижения уровней высоких вод (по данным для 9 створов на реках Волга, Дон, Северная Двина, Ия, Ганг)
- Построение кривой рисков затопления в нормированных координатах без расчета конкретной величины ущерба в стоимостном выражении
- Определение глубин затопления, приводящих к максимальным рискам, а так же высотных отметок верха защитных сооружений, обеспечивающих минимизацию рисков.

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Оценка рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности экстремальными наводнениями и мероприятия по их превентивной защите.

Расчетная схема затопления селитебной территории, расположенной в пойме реки



Научно-методические основы детерминированно-вероятностной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Определяющие факторы ущерба от затопления (для локальной области)

1. Динамический напор на единицу длины сооружения (либо на людей, транспортные средства и т.п.)

$$F = \rho h \frac{v^2}{2} \quad \text{где } \rho - \text{плотность жидкости,}$$

v – средняя по глубине скорость течения

2. Фактор статического воздействия стояния уровня в период времени, обозначенный G , пропорциональный произведению глубины стояния высоких вод на время стояния воды T

$$G = \rho g T h = K h^2 \quad \text{где } h - \text{глубина стояния,}$$

T – время стояния (пропорционально глубине)

Оба перечисленных фактора приводят как к разрушению или порче сооружений, инфраструктурных и сельскохозяйственных объектов, так и к травмам или гибели людей в зависимости от силы и продолжительности воздействия высоких вод.

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Вывод формулы для ущерба от затопления селитебной территории

$$F = \rho g h^2 \frac{I}{\lambda} = K_1 h^2$$

где g – ускорение свободного падения,
 I – продольный уклон водной поверхности в реке,
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления

Вводя некие стоимостные коэффициенты A_1 и A_2 (которые зависят от плотности застройки, вида, этажности и стоимости квадратного метра жилья, стоимости объектов инфраструктуры, стоимости сельхозпродукции на затопляемых территориях, ущерба экологии и т.п.), получаем:

Величина локального ущерба (на единицу площади) в стоимостном выражении

$$D_{LOC} = (A_1 K_1 + A_2 K_2) h^2 = A' h^2$$

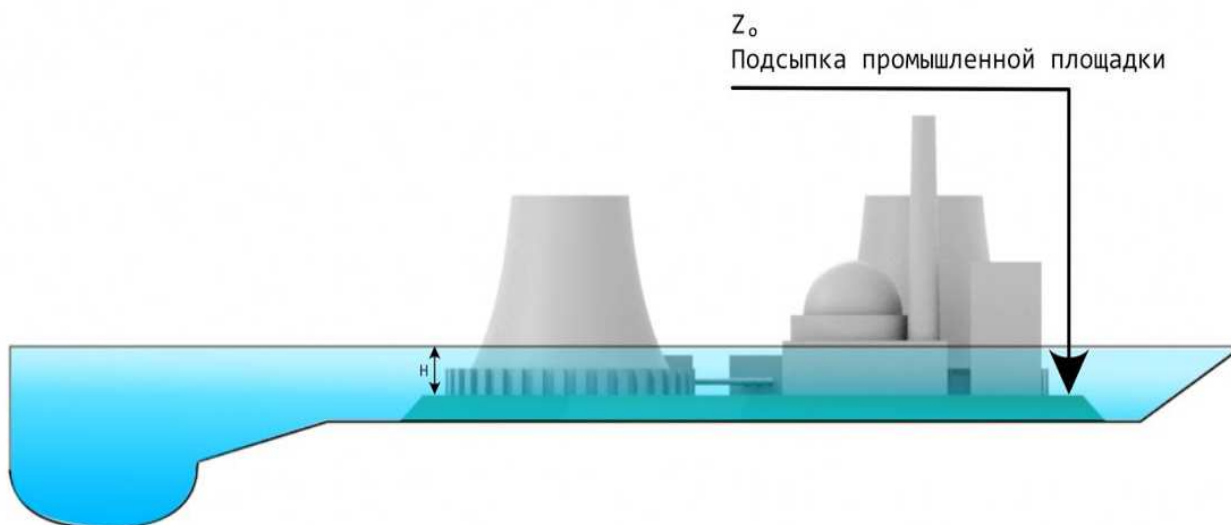
Интегральная (по площади затопления) величина ущерба в стоимостном выражении

$$D = \oint_S D_{LOC} dS = \oint_S A' h^2 dS = A' L B H^2 + \int_0^H L A' \cot \alpha h^2 dh = C_1 H^3 + C_2 H^2$$

где C_1, C_2 – стоимостные коэффициенты

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Расчетная схема затопления объекта повышенной опасности



Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Суммарная величина ущерба для объектов повышенной опасности в стоимостном выражении

В случае объектов повышенной опасности суммарный ущерб будет определяться не степенной, а показательной функцией вида

$$D = C_3 \cdot \left(e^{\frac{H}{C}} - 1\right)$$

C_3 – стоимостной коэффициент;

H – глубина затопления, отсчитываемая не от поверхности поймы, а от верха промышленной площадки АЭС, на которой в одной отметке располагаются все сооружения атомной станции;

C – некоторый коэффициент, имеющий размерность длины. Выберем его таким образом, чтобы ущерб от затопления промплощадки АЭС на каждый последующий метр увеличивался примерно в 10 раз. Тогда $C=0.4$ м.

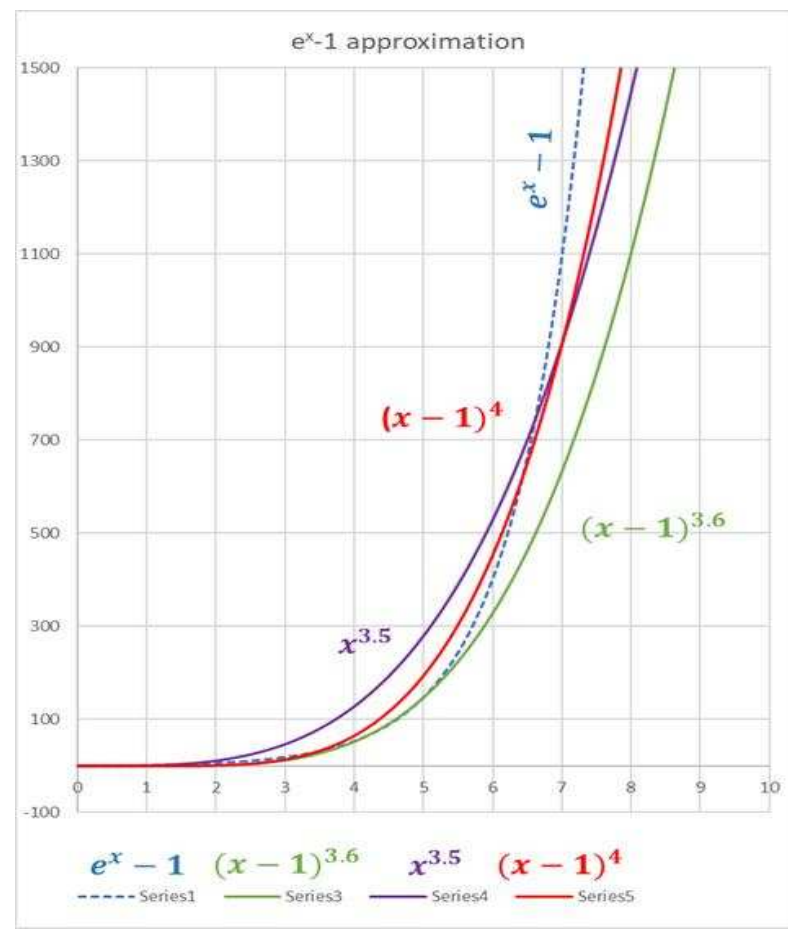
Показательная функция в нужном нам диапазоне изменения $0 < H/C < 8$ может быть аппроксимирована степенными функциями вида

$$D = C_3 \left(\frac{H}{C} - 1\right)^4 \quad \text{или} \quad D = C_3 \left(\frac{H}{C}\right)^{3.5}$$

(см. следующий слайд)

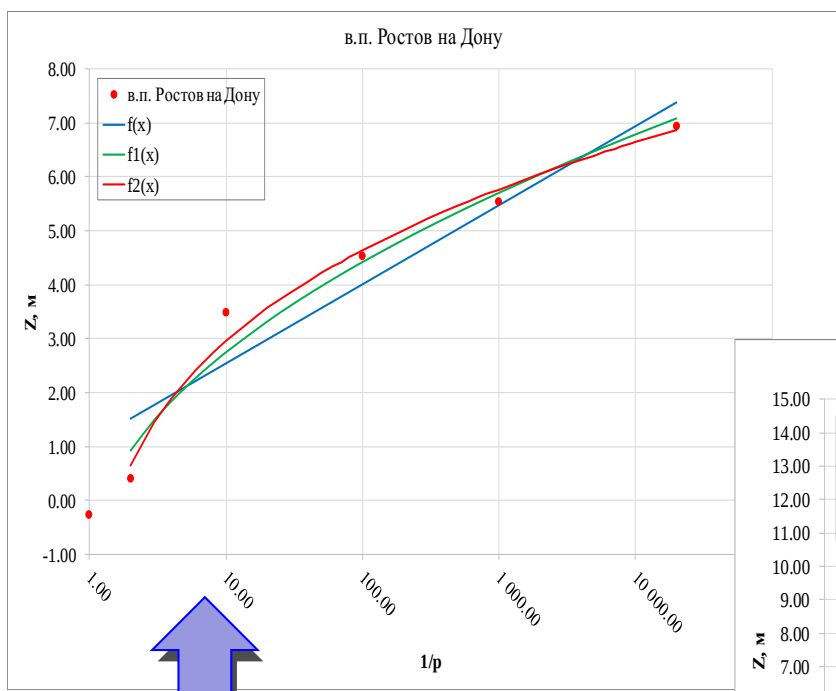
Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Приближенная аппроксимация показательной функции степенной



Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

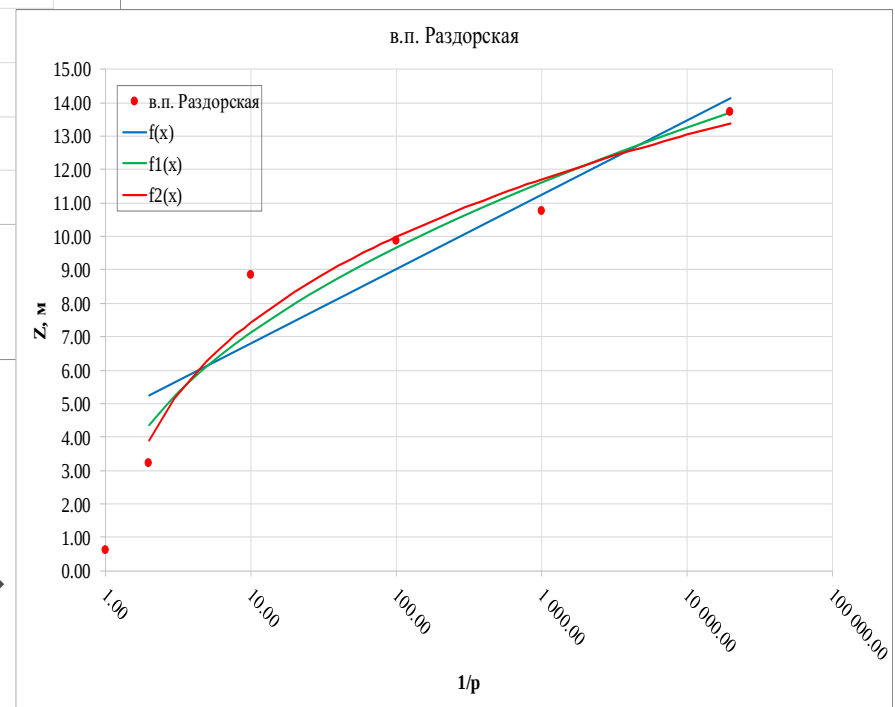
Исходные данные для оценки риска затопления



Зависимость связи уровней воды с повторяемостью достижения этих уровней для р.Дон

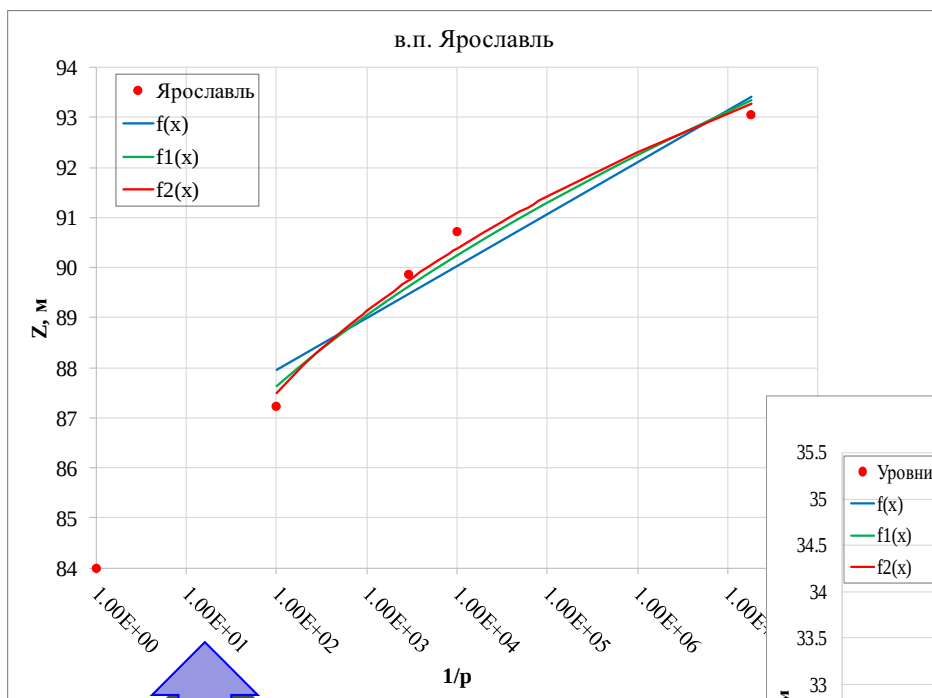
в.п. Ростов на Дону

в.п. Раздорская

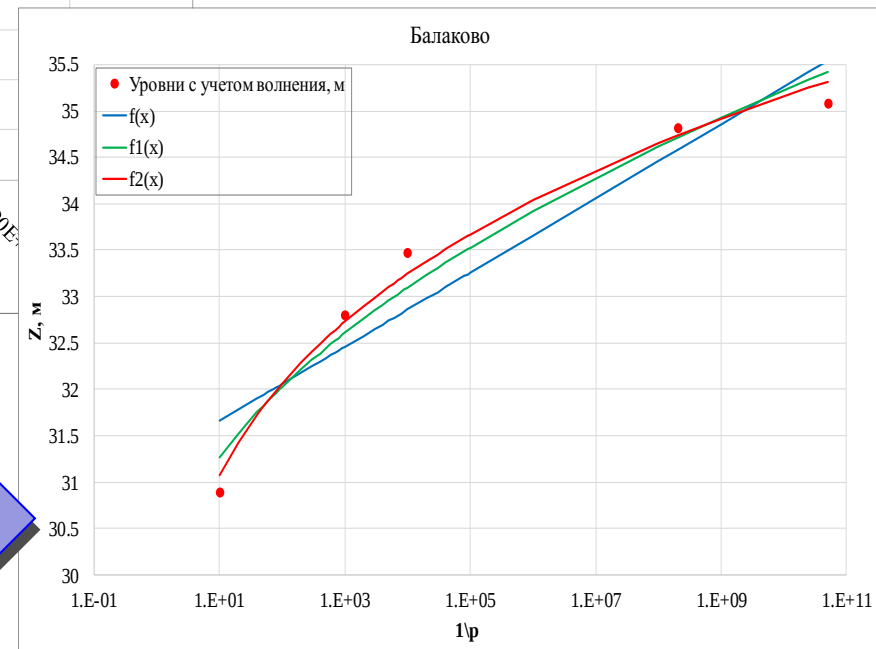


Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Исходные данные для оценки риска затопления



Зависимость связи уровней воды с повторяемостью достижения этих уровней для р.Волга

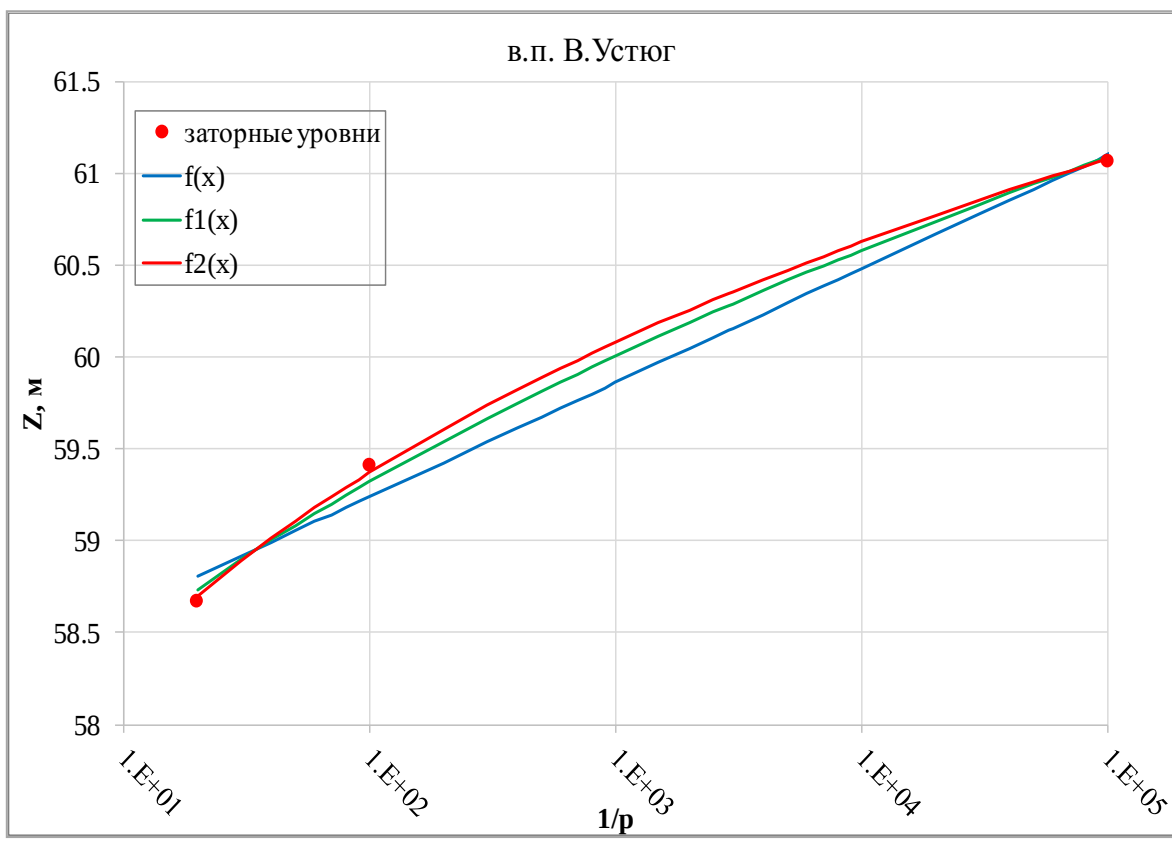


в.п. Ярославль

в створе Балаковской АЭС

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Исходные данные для оценки риска затопления

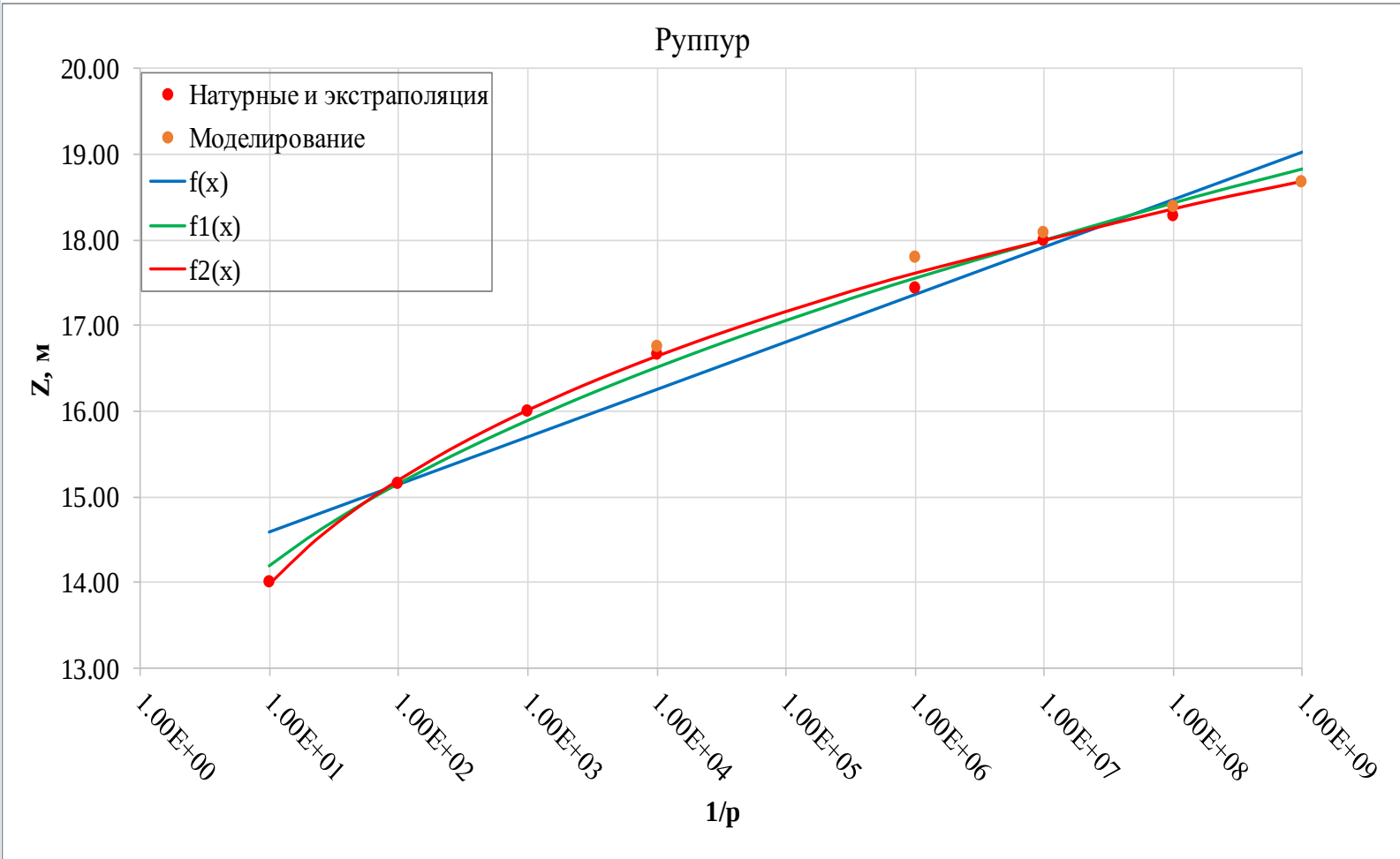


*Зависимость связи
уровней воды с
повторяемостью
достижения этих
уровней для
р.Северная Двина*

в.п. В.Устюг

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Исходные данные для оценки риска затопления



Зависимость связи уровней воды с повторяемостью достижения этих уровней для р.Ганг, створ Руппур

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Параметры аппроксимации зависимостей связей уровней воды с повторяемостью их достижения

Створы	$f(x) = a \cdot \ln(x) + b$	$f_1(x) = a \sqrt{\ln(x)} + b$	$f_2(x) = a \sqrt[4]{\ln(x)} + b$
в.п. Ростов на Дону	a=0.6375; b=1.065;	a=2.664; b=-1.296;	a=7.229; b=-5.95;
	SSE=2.628; R2=0.8923	SSE=0.8913; R2=0.9635	SSE=0.4189; R2=0.9828
Багаевский гидроузел НБ	a=0.7426; b=2.544;	a=3.152; b=-0.3061;	a=8.627; b=-5.917;
	SSE=6.121; R2=0.8284	SSE=2.76; R2=0.9226	SSE=1.512; R2=0.9576
в.п. Багаевская	a=0.7365; b=2.985;	a=3.12; b=-0.1711;	a=8.534; b=-5.374;
	SSE=5.945; R2=0.8302	SSE=2.758; R2=0.9212	SSE=1.584; R2=0.9548
в.п. Раздорская	a=0.9632; b=4.583;	a=4.04; b=0.986;	a=11; b=-6.127;
	SSE=9.341; R2=0.8419	SSE=4.986; R2=0.9156	SSE=3.501; R2=0.9407
в.п. Ярославль	a=0.4521; b=85.87;	a=2.936; b=81.34;	a=10.38; b=72.3;
	SSE=1.273; R2=0.9263	SSE=0.5228; R2=0.9697	SSE=0.2558; R2=0.9852
Руппур (р. Ганг)	a=0.241; b=14.04;	a=1.528; b=11.87;	a=5.223; b=7.549;
	SSE=0.8672; R2=0.9552	SSE=0.1258; R2=0.9935	SSE=0.008937; R2=0.9995
Балаково	a=0.1736; b=31.26;	a=1.205; b=29.44;	a=4.262; b=25.82;
	SSE=1.336; R2=0.8837	SSE=0.441; R2=0.9616	SSE=0.1475; R2=0.9872
в.п. Великий Устюг	a=0.2694; b=58;	a=1.418; b=56.28;	a=4.528; b=52.74;
	SSE=0.048; R2=0.984	SSE=0.012; R2=0.996	SSE=0.002; R2=0.9993

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Определение нормализованного риска затопления пойменных территорий

Запишем вероятность затопления согласно подобранным выше логарифмическим аппроксимациям этих кривых в виде

$$P = e^{-\left(\frac{z-b}{a}\right)^{\beta}}, \text{ где } 1 \leq \beta \leq 4, z \geq b. \text{ При } z = b \quad P = 1.$$

$$P' = -\frac{\beta}{a} \cdot \left(\frac{z-b}{a}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{z-b}{a}\right)^{\beta}}$$

Для величины риска затопления с учетом интегральной величины ущерба получим

$$R = A \cdot P \cdot (z - z_0)^{\gamma} \quad 2 \leq \gamma \leq 4$$

$$R' = A \cdot [P' \cdot (z - z_0)^{\gamma} + \gamma \cdot (z - z_0)^{\gamma-1} \cdot P]$$

Из условия экстремума $R' = 0$ с учетом $P' = -\frac{\beta}{a} \cdot \left(\frac{z-b}{a}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{z-b}{a}\right)^{\beta}}$ следует

$$-\frac{\beta}{a} \cdot \left(\frac{z-b}{a}\right)^{\beta-1} \cdot (z - z_0)^{\gamma} + \gamma \cdot (z - z_0)^{\gamma-1} = 0 \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{z-b}{a}\right)^{\beta-1} \cdot \frac{(z - z_0)}{a} = \frac{\gamma}{\beta}$$

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Определение нормализованного риска затопления селитебной территории (продолжение)

Обозначим $z - z_0 = H$. При $\beta = 2$ получается квадратное уравнение $(z - b)(z - z_0) = \frac{\gamma}{2} \cdot a^2$

где $z - b = H + z_0 - b$. После преобразования получаем $\frac{H + z_0 - b}{a} \cdot \frac{H}{a} = \frac{\gamma}{2}$

Обозначим $\frac{H}{a} = H_N$ – нормированная глубина затопления, тогда

$$\left(H_N + \frac{z_0 - b}{a}\right) \cdot H_N = \frac{\gamma}{2} \quad H_N^2 + \frac{z_0 - b}{a} \cdot H_N - \frac{\gamma}{2} = 0$$

Обозначим $\Delta_N = \frac{z_0 - b}{a} \geq 0$, иначе $P(z_0) > 1$. $H_N^2 + \Delta_N \cdot H_N - \frac{\gamma}{2} = 0$

Если $\Delta_N = 0$ (частный случай $z_0 = b$), то $H_{N*} = \sqrt{\frac{\gamma}{2}}$, где нормированная глубина со звёздочкой H_{N*} обозначает глубину затопления, которой соответствует наибольший риск

В общем случае наихудшая (опасная) нормированная глубина равна:

$$H_{N*} = \frac{-\Delta_N + \sqrt{\Delta_N^2 + 2\gamma}}{2} = -\frac{\Delta_N}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta_N}{2}\right)^2 + \frac{\gamma}{2}}$$

Научно-методические основы ...

При $2 \leq \beta \leq 4$ $R = A \cdot e^{-(H_N + \Delta_N)^\beta} \cdot H_N^\gamma$, нормированный риск выражается формулой

$$R_N = \frac{R}{A \cdot a^\gamma} = H_N^\gamma \cdot e^{-(H_N + \Delta_N)^\beta}$$

По этой формуле могут быть рассчитаны нормализованные риски затопления при подстановке в неё фактических параметров, представленных для анализируемых створов в таблице 2. Нормализованный риск зависит от трёх параметров γ, Δ_N, β , которые определяются условиями местности, типом застройки и видом кривой вероятности.

Таблица 2. Параметры для расчета величины риска при $\beta = 2, \gamma = 2.5$

Створы	a, м	b, м	z_0	Δ_N	H_{N*}
в.п. Ростов на Дону	2.66	-1.30	2.00	1.2372	0.66
Багаевский гидроузел НБ	3.15	-0.31	3.50	1.2075	0.67
в.п. Багаевская	3.12	-0.17	4.50	1.4971	0.60
в.п. Раздорская	4.04	0.99	6.00	1.2411	0.66
в.п. Ярославль	2.94	81.34	87.00	1.9278	0.51
Руппур	1.53	11.87	14.00	1.3940	0.62
Балаково	1.21	29.44	31.00	1.2946	0.64
в.п. Великий Устюг	1.42	56.28	56.54	0.1834	1.03
Тулун	5.28	450.90	458.00	1.3447	0.63

Научно-методические основы ...

С учетом таблицы 2 построены графики для исследуемых створов (за исключением В. Устюга, график для которого расположен на порядок выше по оси ординат). Видно, что все кривые имеют выраженные максимумы, а при больших H_N быстро убывают до нуля.

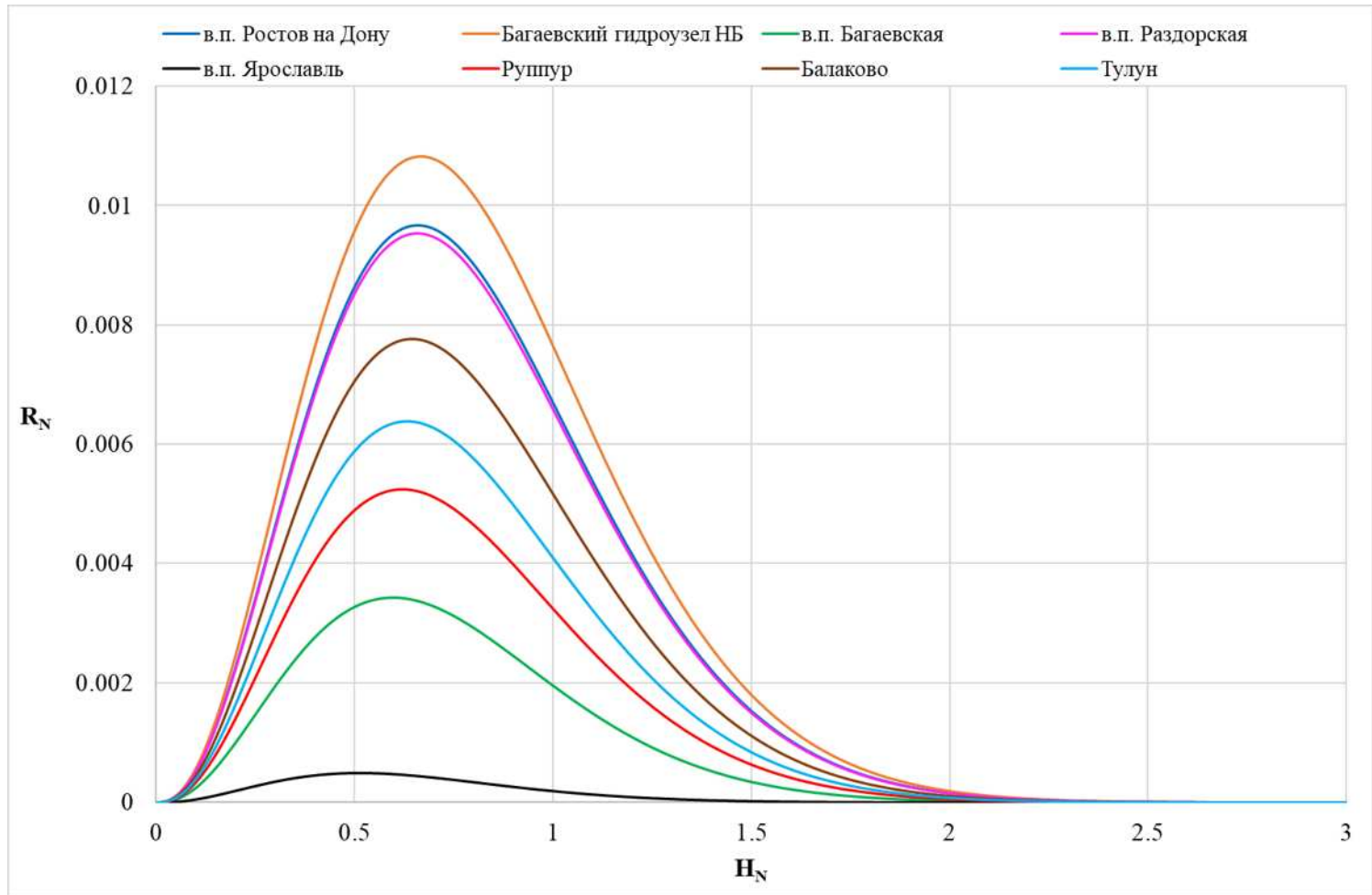


График нормализованных единичных рисков $R_N(H_N)$ при $\beta = 2$, $\gamma = 2.5$ без учета створа в.п. В.Устюг

Например, для г. Ростов-на-Дону $H_{N*} = 0.66$, что означает, что размерная глубина H_* , соответствующая максимальному риску от затопления, равна $0.66 \cdot 2.66 \text{ м} = 1.76 \text{ м}$ над нижней отметкой застроенной поймы $Z_0 = 2.0 \text{ мБС}$ (табл. 2). Соответственно, опасная (в смысле максимального риска) отметка затопления равна 3.76 мБС , что приблизительно соответствует 2-3% затоплению и на 0.7 м ниже отметки однопроцентного затопления 4.45 мБС .

Для ст. Раздорской с тем же $H_{N*} = 0.66$ размерная глубина H_* , соответствующая максимальному риску от затопления, равна $0.66 \cdot 4.04 \text{ м} = 2.67 \text{ м}$ над нижней отметкой застроенной поймы $Z_0 = 6.0 \text{ мБС}$ (табл. 2). Соответственно, опасная отметка затопления равна 8.7 мБС , что также приблизительно соответствует 2-3% затоплению и на 1.0 м ниже отметки однопроцентного затопления.

Для г. Тулун $H_{N*} = 0.63$, размерная глубина H_* , соответствующая максимальному риску от затопления, равна $0.63 \cdot 5.28 \text{ м} = 3.33 \text{ м}$ над нижней отметкой застроенной поймы $Z_0 = 458.0 \text{ мБС}$ (табл. 2). Соответственно, опасная отметка затопления равна 461.3 мБС , что также приблизительно соответствует 2-3% затоплению и на 0.9 м ниже отметки однопроцентного затопления.

Таким образом, в рассмотренных примерах, да и для большинства других объектов, уровень максимального риска единичного затопления находится в районе отметки 2-3%-го затопления, а уровень 1% затопления примерно на $0.7\text{-}1.0 \text{ м}$ выше. Поэтому защита селитебной территории от 1% затопления минимизирует риски немного более чем на 50%, что явно недостаточно для надежной защиты территории от наводнений.

На основе анализа расчетных данных выявлено, что высокая степень защиты селитебных территорий с маленьким риском будет обеспечена при подъеме отметок защитных сооружений на уровень затопления вероятностью порядка $10^{-3} - 10^{-4} \text{ 1/год}$, но уж никак не 10^{-2} 1/год (один раз в 100 лет), которая принята в настоящее время в РФ по нормативным документам.

Построение интегральных кривых рисков затопления

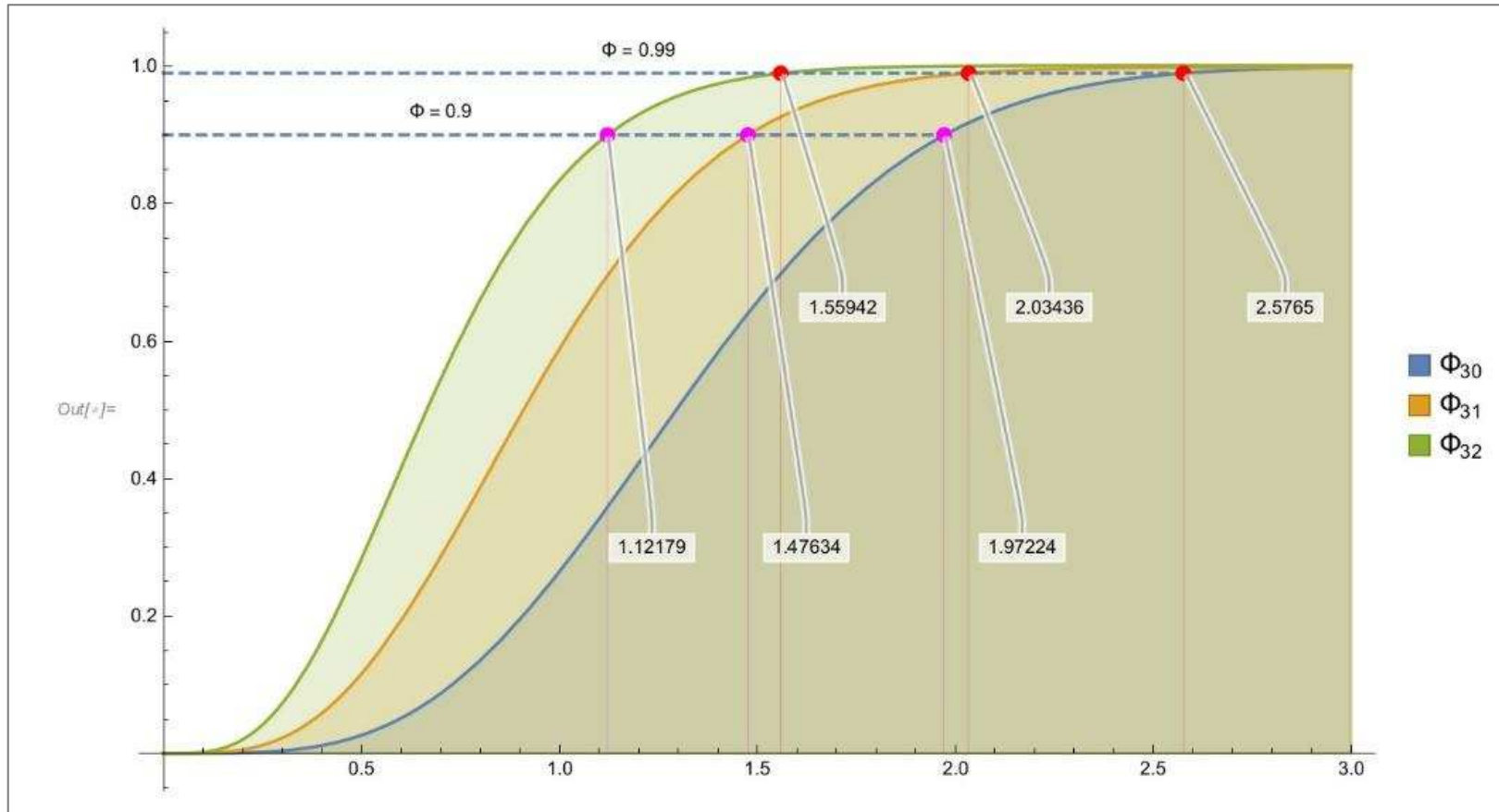
Выше рассматривались риски единичного затопления, т.е. когда для данной территории единоразово произошло катастрофическое затопление. Однако если мы ставим вопрос о долговременной защите какой-то территории от возможного затопления, то следует рассмотреть вопрос об остаточном риске, который возникнет только после того, как критический уровень воды превысит уровень защитных сооружений, а при меньших уровнях никаких рисков не будет, поскольку не будет затоплений селитебных территорий или ОПО (конечно, при условии обеспечения надежности работы этих сооружений).

Для решения этой задачи надо рассчитать нормализованный интегральный риск, который возникает при достижении заданной отметки затопления (совпадающей, по-видимому, с отметкой верха защитных сооружений). В общем случае он выражается величиной интеграла

$$I_{\gamma\Delta}(x) = \int_0^x x^{\gamma} e^{-(\Delta+x)^2} dx$$

где для упрощения записи мы принимаем $x=H_N$ - нормированная глубина затопления.

Однако, как видно из таблицы 2, значения Δ , близкие к нулю, довольно редки, а наиболее часто встречающиеся значения лежат в диапазоне 1.1-1.5. При этом характерное значение гамма равно 3 (лежит посередине между предельными значениями 2 и 4). Опуская достаточно элементарные выкладки, приведем графики решения интегральных уравнений для этих значений. Видно, что в этих наиболее характерных случаях x лежит в диапазоне от 1.5 до 2.0.



Нормированные интегральные функции распределения нормализованного (безразмерного) риска при $\Delta = 0, 1, 2$ и $\gamma = 3$

Если же эти безразмерные глубины (нормированные на параметр a) пересчитать в доли характерных опасных глубин H_{N*} , которые соответствуют максимальным рискам при одноразовом затоплении, то получим приближенную оценку, согласно которой **минимизация рисков на 90% достигается при удвоенной опасной глубине затопления, а минимизация на 99% - при утроенной опасной глубине (типа правила трех сигма).**

Выводы

1. Разработаны научно-методические основы приближенной теоретической оценки рисков затопления природными и техногенными паводками селитебных территорий и объектов повышенной опасности, расположенных в поймах рек. Показано, что с учетом некоторых допущений величина ущерба от затопления пропорциональна глубине затопления в степени от 2.0 до 3.0, со средним показателем степени 2.5.
2. Для объектов повышенной опасности величина ущерба зависит от глубины затопления не по степенному, а по показательному (экспоненциальному) закону, что связано со спецификой развития аварий на таких объектах. Однако в рассматриваемом диапазоне глубин затопления (до нескольких метров) она может быть с приемлемой точностью аппроксимирована степенной зависимостью с показателем 3.5-4.0, что обеспечивает единую методику расчета.
3. Для оценки рисков затопления строится кривая связи уровней затопления рассматриваемого объекта с вероятностью достижения этих уровней (кривая вероятности затопления), которая имеет экспоненциальный вид.
4. Кривая плотности распределения рисков затопления получается перемножением зависимости вероятного вреда от глубины затопления на вероятность достижения этой глубины. С использованием натурных данных и результатов математического моделирования построены такие кривые для девяти створов на пяти реках: Волга -2, Н.Дон -4, Северная Двина -1, Ганг -1, Ия -1.

Научно-методические основы приближенной оценки нормализованных рисков затопления селитебных территорий и объектов повышенной опасности

Выводы (продолжение)

5. Интегральная функция распределения нормированного (безразмерного) риска получается путем интегрирования кривой плотности распределения по глубине. На основе кривых рисков затопления и интегральных функций распределения можно планировать мероприятия по защите населенного пункта или объекта повышенной опасности от затопления. На конкретных примерах показано, что уровень воды, соответствующий максимальному риску для данного объекта (опасный уровень), в большинстве случаев довольно близок к уровню двухпроцентного затопления, и что защиты до отметок однопроцентного затопления или запрета строительства только в этой зоне недостаточно для надежного обеспечения безопасности селитебных территорий.

6. Выведено простое правило, согласно которому минимизация рисков на 90% достигается при защите территории до удвоенной опасной глубины затопления, а минимизация на 99% - при утроенной опасной глубине. **Защита же селитебной территории до уровня 1%-го затопления, как это сейчас принято по нормативам, дает защиту от рисков затопления примерно на 50%, что, по существу, не имеет смысла и даже вредно.**

