

УДК 547.912.004.4:331.461.003.12

© Коллектив авторов, 2004

Оценка риска аварий на объектах хранения и перевалки нефти и нефтепродуктов

А.В. Пчельников,
канд. физ.-мат. наук,

А.И. Гражданкин, И.А. Кручинина,
кандидаты техн. наук,

С.И. Сумской, Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов,
д-р техн. наук (ФГУП "НТЦ "Промышленная безопасность")

В государственном реестре опасных производственных объектов (ОПО) содержатся сведения о почти тысяче нефтебаз и объектов хранения нефти и нефтепродуктов. Из них более 50 - объекты, для которых законодательством в области промышленной безопасности установлена обязательная разработка декларации промышленной безопасности.

Обеспечение промышленной безопасности ОПО предполагает использование процедуры анализа риска аварий для обоснования и принятия эффективных управленческих решений на основе выявленных наиболее "опасных мест" в технологической системе объекта.

В данной статье сравниваются основные результаты анализа риска аварий, выполненного для крупной перевалочной нефтебазы (ПНБ) и связанной с ней магистральным нефтепроводом (длина около 20 км) линейной производственно-диспетчерской службы (ЛПДС). Декларируемые объекты расположены в южном регионе России, вблизи имеются населенные пункты, транспортные пути и водные объекты. На территории ПНБ находятся третьи лица (около 400 чел.) - пожарные, строители, население. Характеристика ПНБ и ЛПДС представлена в табл. 1.па

Таблица 1

Показатели	ПНБ	ЛПДС
Составляющие объекта	Резервуарные парки (нижний, верхний, дополнительный); железнодорожная сливноналивная эстакада; туннель с технологическими трубопроводами	Проектируемый дополнительный резервуарный парк
Основное емкостное оборудование	Резервуары: подземные железобетонные ЖБР-10000, наземные с плавающей крышей РВСПК-50000	Наземные резервуары с плавающей крышей РВСПК-50000
Количество обращающихся опасных веществ, тыс. т	882	188,5
В том числе:		
нефть и темные нефтепродукты	858	188
светлые нефтепродукты	24	-
Численность персонала, чел.	~500	~120

При оценке масштабов возможных техногенных опасностей на рассматриваемых объектах были выделены основные сценарии развития аварий:

наиболее опасные - полное разрушение наземного резервуара с нефтью (в том числе с перехлестом нефти через обвалование) с последующим распространением облака нефтяных паров, воспламенением, взрывом, пожаром пролива; взрыв паров нефти в туннеле ПНБ (длина 3,5 км, диаметр 5 м);

наиболее вероятные - частичное разрушение насосного агрегата; локальные утечки из технологического оборудования, трубопроводов. При развитии аварий по этим сценариям возможны воспламенение нефти (нефтепродукта) и пожар пролива.

Основные поражающие факторы перечисленных аварий: тепловое излучение, воздействие ударной волны, попадание в открытое пламя, поражение осколками. При оценке вероятных зон поражения (разрушения)

использовали:

Методику оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409-01) - для определения зон поражения при горении и взрыве облаков топливно-воздушных смесей;

Руководство по оценке промышленных опасностей (Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual. World Bank Tech. Paper No. 55) - для расчета рассеяния тяжелого газа, определения массы вещества, участвующего в горении (взрыве);

ГОСТ Р 12.3.047-98. "Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля" - для определения зон поражения тепловым излучением при горении пролива;

компьютерный код "Turbojet" (разработан специалистами ИХФ РАН и МИФИ) - для расчета двумерных турбулентных газодинамических течений с ударными волнами.

При авариях с наиболее тяжелыми последствиями зоны поражения (разрушения) могут достигать нескольких сот метров; размер опасных зон при возникновении пожара разлития будет ограничен несколькими десятками метров от края пролива. Если при оценке последствий ряда аварий отсутствовали необходимые исходные данные, то при расчетах использовали консервативный подход, при котором тяжесть последствий могла быть завышена. Например, при оценке размеров дрейфующего облака паров нефти или нефтепродуктов при низких скоростях ветра расчет всегда проводился для наиболее устойчивой стратификации атмосферы (наихудших условий рассеяния). Такие размеры зон поражения (разрушения) и оценки ущерба следует рассматривать как максимальные. В реальных условиях они могут оказаться существенно меньше. Этому способствуют следующие факторы, снижающие масштаб крупных аварийных ситуаций на рассматриваемых объектах:

часть людей находится в помещении, поэтому при возникновении аварии на наружных установках они будут в определенной степени защищены;

при дрейфе паровоздушное облако может не достигнуть мест скопления людей, а воспламениться раньше;

при воспламенении дрейфующего облака всегда проходит некоторое время между инициирующим аварией событием и собственно возникновением в данной точке поражающего фактора, поэтому при своевременном обнаружении возникшей аварии возможно принятие адекватных мер по ее локализации и выводу людей, не занятых в ликвидации аварии, из зоны возможного поражения;

на объектах существует ряд стеновых конструкций, ограничивающих дрейф паров нефти и нефтепродуктов (обвалования резервуарных парков, стена с одной из сторон железнодорожной эстакады). Для ограничения дрейфа достаточно препятствия высотой в несколько метров;

рельеф местности, где расположены ПНБ и ЛПДС, способствует локализации разлива нефти или нефтепродуктов, а также облаков паровоздушных смесей в местах, удаленных от сосредоточения людей;

низкие температуры и сильный ветер в холодное время года сводят вероятность образования протяженных облаков топливовоздушных смесей к минимуму;

действия по локализации и ликвидации последствий аварии могут существенно снизить объемы выбросов нефти и нефтепродуктов, а также долю потерянной продукции, в том числе при выгорании.

В ходе работ по декларированию ПНБ было выполнено детальное численное моделирование перехода горения в детонацию смеси паров нефти с воздухом в технологическом туннеле, которое показало, что при детонации внутри подобных протяженных объектов истечение продуктов и их расширение происходят за несколько секунд. При этом генерируется волна сжатия узкой направленности (меньшей мощности в направлениях, отличных от направления выброса горячих продуктов). Необходимо отметить, что наличие турбулентности, успевающей развиться за это время, также снижает интенсивность ударной волны.

В случае реализации рассматриваемых аварийных ситуаций возможно разрушение соседнего оборудования, что может привести к дальнейшей эскалации аварии. Это обстоятельство может увеличить площадь зон поражения.

Предполагая адекватные действия персонала и пожарных при возникновении аварийной ситуации на ПНБ и в ЛПДС, в среднем количество пострадавших при реализации наиболее опасных сценариев может составить 20-30 чел., наиболее вероятных - до 1-2 человек.

В табл. 2 приведены оценки составляющих возможного ущерба от аварий на рассматриваемых объектах, определенные в соответствии с РД 03-496-02.

Таблица 2

Составляющая ущерба	Краткая характеристика	Размер ущерба
Прямые потери	Сумма потерь в результате уничтожения или повреждения оборудования, строений, транспортных средств, продукции и т.д.	При наиболее опасных сценариях может достигать сотен миллионов рублей, при вероятных - нескольких миллионов
Социально-экономические потери	Затраты на компенсацию и проведение мероприятий вследствие гибели (травмирования) персонала и третьих лиц	Определяется числом пострадавших; в случае наиболее опасных аварий может составлять десятки миллионов рублей
Ущерб от выбытия трудовых ресурсов	Ущерб государству, связанный с недополучением валового внутреннего продукта в результате гибели людей или потери ими трудоспособности	Зависит от возможного числа погибших в результате аварии; в среднем по России при гибели одного человека составляет около 1 млн. руб. [1]; в случае наиболее опасных аварий может достигать десятков миллионов рублей
Косвенный ущерб	Упущенная экономическая выгода и убытки, вызванные уплатой различных штрафов, неустоек, пени и др.	С учетом ключевого значения объектов в транспортировании нефти при крупных авариях может быть доминирующим
Экологический ущерб	Урон, нанесенный объектам окружающей среды (оценивался как сумма плат за сверхнормативное загрязнение окружающей среды)	При выгорании нефти в результате пожаров в количестве, близком к вместимости резервуара РВС-50000, может достигать нескольких миллионов рублей
Затраты на локализацию (ликвидацию) аварии	Расходы, связанные с локализацией, ликвидацией и расследованием аварии	От нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов рублей

Учитывая статистику аварий на подобных объектах, протяженность трубопроводов, а также тип и количество оборудования, на декларируемых объектах была оценена частота возникновения аварий с появлением поражающих факторов (взрывы, пожары) (табл. 3). Данный показатель для трубопроводов и резервуаров всех составляющих ПНБ приведен ниже (год⁻¹):

Трубопроводы в туннеле	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Трубопроводы эстакады	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Трубопроводы резервуарных парков:	
нижнего	$3,5 \cdot 10^{-3}$
верхнего	$2,1 \cdot 10^{-4}$
дополнительного	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Резервуарный парк:	
нижний	$1,8 \cdot 10^{-2}$
верхний	$2,1 \cdot 10^{-3}$
дополнительный	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Из табл. 3 видно, что с наибольшей частотой можно ожидать возникновения аварий с появлением поражающих факторов на резервуарах, насосах и железнодорожных цистернах. Значения частоты возникновения аварий с появлением поражающих факторов выбраны на основе обобщенных статистических данных [2].

Таблица 3

Место аварии	Частота возникновения аварий с появлением поражающих факторов, год ⁻¹	
	ПНБ	ЛПДС
Трубопроводы	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Резервуарный парк	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Насосное оборудование	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$
Железнодорожные цистерны	$1,5 \cdot 10^{-2}$	-
Всего по объекту	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$

С учетом частоты аварий и размера зон поражения определено пространственное распределение потенциального территориального риска (поле потенциального риска), показывающее частоту реализации поражающего фактора, приводящего к смертельному для человека исходу (уровень потенциального риска, год⁻¹), как на территории ПНБ и ЛПДС, так и на прилегающих площадях (рис. 1). Наиболее опасные территории ПНБ - районы резервуарных парков и железнодорожной сливноналивной эстакады, а ЛПДС - места размещения резервуаров и насосных. За пределами резервуарных парков ПНБ и ЛПДС потенциальный риск возникновения смертельного поражающего фактора составляет $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. В эту зону попадают жилые дома, расположенные вблизи железнодорожной эстакады (ПНБ), автомобильная и железная дороги, северные кварталы близлежащего населенного пункта (ЛПДС).

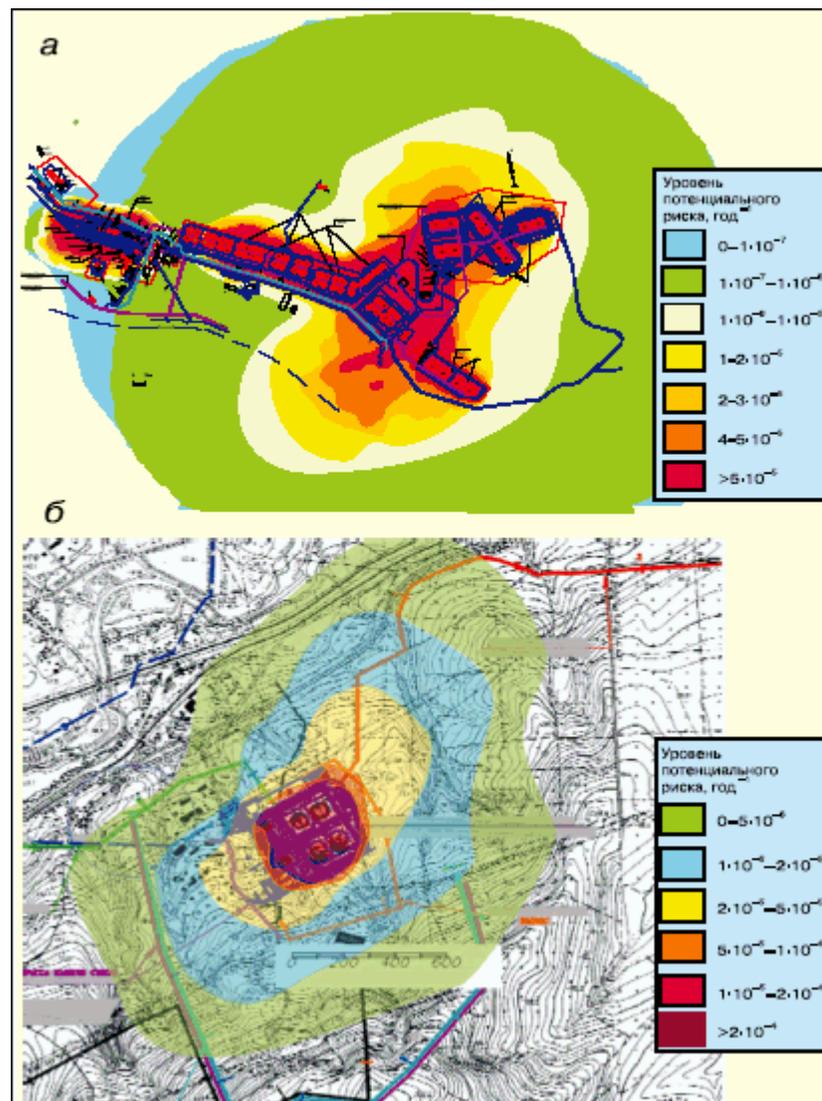


Рис. 1. Поле потенциального территориального

риска ПНБ (а) и ЛПДС (б)

На основе полученного поля потенциального территориального риска и сведений о пространственновременном распределении людей по территории рассматриваемых объектов оценен коллективный риск гибели различных категорий людей (чел/год), т.е. ожидаемое число смертельно пострадавших от аварий за год.

Общий коллективный риск для ПНБ составил $5,8 \cdot 10^{-2}$ чел/год, а коллективный риск для разных категорий людей этого объекта приведен ниже:

Персонал	$4,9 \cdot 10^{-2}$
В том числе:	
нижнего резервуарного парка	$2,6 \cdot 10^{-3}$
верхнего резервуарного парка	$7,4 \cdot 10^{-3}$
дополнительного резервуарного парка	$6,4 \cdot 10^{-4}$
железнодорожной сливоналивной эстакады	$1,2 \cdot 10^{-2}$
насосных	$8,7 \cdot 10^{-3}$
туннеля	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Население	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Пожарные	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Строители в период:	
реконструкции	$4,1 \cdot 10^{-3}$
эксплуатации	$8,3 \cdot 10^{-4}$

Для ЛПДС общий коллективный риск $4,3 \cdot 10^{-3}$ чел/год, для разных категорий людей коллективный риск следующий:

Персонал	$4,2 \cdot 10^{-3}$
В том числе:	
резервуарного парка	$1,1 \cdot 10^{-3}$
насосных	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Население	$5,0 \cdot 10^{-4}$

По величине коллективного риска наиболее опасны: железнодорожная сливоналивная эстакада, резервуарные парки - на ПНБ, насосные - на ЛПДС.

По среднему индивидуальному риску для различных категорий людей наибольшему риску подвергается персонал ПНБ (табл. 4).

Таблица 4

Категория людей	Средний индивидуальный риск, год ⁻¹	
	ПНБ	ЛПДС
Персонал	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Пожарные	$5,9 \cdot 10^{-5}$	-
Строители	$4,4 \cdot 10^{-5}$	-
Население	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$

Были построены F/N - и F/G -кривые, характеризующие соответственно частоту смертельного поражения от аварий за год персонала, больше определенного числа n (рис. 2) и ожидаемые потери основных фондов от аварий за год (рис. 3). Рассчитано распределение персонала ОПО по уровням потенциального риска (рис. 4).

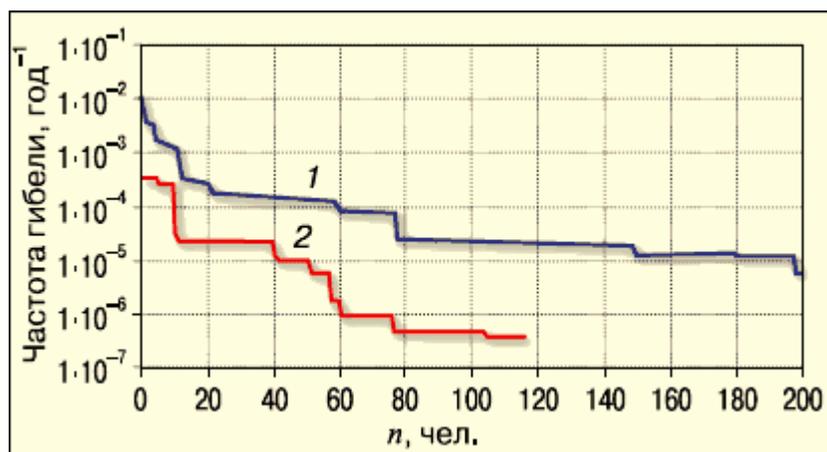


Рис. 2. Частота смертельного поражения от аварий за год персонала, более n человек, год^{-1} :
1 - ПНБ, 2 - ЛПДС



Рис. 3. Ожидаемые потери основных фондов от аварий за год:
1 - ПНБ, 2 - ЛПДС



Рис. 4. Распределение персонала ПНБ (а) и ЛПДС (б)

по уровням потенциального риска

Сравнивая социальный риск (см. рис. 2) на рассматриваемых объектах, очевидно, что *F/N*-кривая для ПНБ более пологая и протяженная по сравнению с аналогичной кривой для ЛПДС. Это объясняется бо́льшим числом возможных аварий с гибелью людей за год и значительными масштабами максимальных гипотетических аварий. На рис. 4 видно, что основная часть персонала ПНБ находится на территории с уровнем потенциального риска $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹, на ЛПДС - $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹.

Основные показатели риска аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС) для ПНБ и ЛПДС (табл. 5) в целом ниже фоновых (среднестатистических) показателей риска, связанных с обыденной жизнью человека. В Российской Федерации за 2002 г. фоновые показатели риска гибели людей (год⁻¹) составили:

в ЧС природного характера [3]	$2,30 \cdot 10^{-6}$
в результате авиакатастроф [3]	$2,00 \cdot 10^{-6}$
при пожаре [4]	$1,38 \cdot 10^{-4}$
в дорожно-транспортных происшествиях*1	$2,30 \cdot 10^{-4}$
от убийств*2	$3,09 \cdot 10^{-4}$
от любых причин*2	$1,62 \cdot 10^{-2}$
от транспортных травм (всех видов)*2	$2,91 \cdot 10^{-4}$
от случайного отравления алкоголем*2	$3,12 \cdot 10^{-4}$

*1 [Http://www.gibdd.ru](http://www.gibdd.ru).

*2 [Http://www.gks.ru](http://www.gks.ru).

Таблица 5

Показатель риска	ПНБ	ЛПДС
Частота аварий, связанных с возникновением поражающих факторов, год ⁻¹	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
Общий коллективный риск гибели от аварий, чел/год	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Коллективный риск гибели от аварий для персонала, чел/год	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Средний индивидуальный риск гибели, год ⁻¹ :		
персонала	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
населения	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Частота возникновения аварий на объектах, год ⁻¹ :		
с гибелью людей	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
с гибелью не менее 10 человек	1,0-10 ⁻³	$3,3 \cdot 10^{-5}$
с гибелью не менее 100 человек	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$
Риск потери от аварии:		
основных фондов, тыс. руб/год	397	703
нефти и нефтепродуктов, т/год	276	29,45

Сравнение проводили также с фоновыми показателями риска в районе нахождения рассматриваемых объектов [5], которые близки к средним по России. Анализируя табл. 5, рис. 2–4 можно констатировать, что ЛПДС (новое оборудование и коммуникации, меньшее число персонала и оборудования, меньшая мощность резервуарного парка) — более безопасный объект, чем ПНБ. Значительные ожидаемые потери основных фондов ЛПДС объясняются наличием большего (относительно ПНБ) массива данных по проектной стоимости объекта.

Для определения влияния возможного изменения типа обращающихся нефтепродуктов на безопасность объекта проведена оценка риска аварий для ПНБ при частичной замене нефти газовым конденсатом, который по

целому ряду показателей - более опасное вещество (ниже температура начала кипения, выше давление насыщенных паров). С этой целью рассмотрены дополнительные сценарии на железнодорожной сливоналивной эстакаде с образованием огненных шаров на цистернах с газовым конденсатом при их попадании в открытое пламя. Расчеты, проведенные в рамках проекта реконструкции ПНБ, показали, что при замене 20 % поступающей в железнодорожных цистернах нефти на газовый конденсат общий коллективный риск увеличится с $5,7 \cdot 10^{-2}$ до $6,4 \cdot 10^{-2}$ чел/год, т.е. не более чем на 12 %. Коллективный риск (чел/год) для разных категорий людей составит:

Население	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Пожарные	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Строители в период: реконструкции	$4,4 \cdot 10^{-3}$
эксплуатации	$8,8 \cdot 10^{-4}$

Другие показатели риска аварий изменяются незначительно.

Таким образом, в результате количественного анализа риска аварий на ПНБ и в ЛПДС:

проведено сравнение опасностей и выявлены наиболее опасные участки и оборудование декларируемых объектов по основным показателям риска, в том числе по частоте аварий с появлением поражающего фактора (по этому показателю наиболее опасны резервуары, насосы и железнодорожные цистерны), ожидаемому числу смертельно пострадавших от аварий за год (наиболее опасны резервуарные парки и железнодорожная сливоналивная эстакада на ПНБ и насосные в ЛПДС);

показано, что индивидуальный риск гибели различных категорий людей при аварии не превышает значений фоновых рисков смертности в России;

подтверждена обоснованность внедряемых мер по повышению промышленной безопасности ПНБ (создание герметичных обвалований достаточной высоты, строительство газоуравнительных линий с подачей в них азота при "больших дыханиях", реконструкция насосных и замена технологических трубопроводов, полистовая сборка резервуаров РВС-50000 и капитальный ремонт резервуаров ЖБР-10000 и др.);

установлено, что замена 1/5 части железнодорожных цистерн с нефтью на цистерны с газовым конденсатом приводит к росту показателей риска не более чем на 12 %, что может рассматриваться как незначительное повышение степени риска аварий.

Результаты работы позволяют сделать вывод о приемлемости уровня риска аварий при эксплуатации рассмотренных объектов и могут быть использованы для разработки стандартов по оценке риска и типовых деклараций промышленной безопасности объектов хранения нефтепродуктов.

Список литературы

1. *К вопросу об оценке стоимости человеческой жизни* / И.А. Кручинина, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров // Безопасность в чрезвычайных ситуациях. - 2003. - N 4. - С. 72-75.
2. *Сучков В.П., Ралюк В.В.* Анализ причин и последствий пожаров в резервуарных парках топливно-энергетического комплекса и мер по их устранению. Материалы конф. "Безопасность в нефтегазовом комплексе", 27 апр. 2000 г. - М., 2000. - С. 69.
3. *Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2002 году.* - М.: ФЦ ВНИИ ГОЧС, 2003. - 178 с.
4. *Стратегические риски ЧС: оценка и прогноз* // Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от ЧС, 15-16 апр. 2003 г. - М.: Триада, Лтд, 2003.
5. *Регионы России. Социально-экономические показатели.* 2002. - М.: Госкомстат России, 2002. - 863 с.