

Методика прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций природного характера на сети автомобильных дорог

Ю.В. Трофименко, заведующий кафедрой, профессор, д-р техн. наук

А.Н. Якубович, профессор, д-р техн. наук

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

e-mail: ywtrofimenko@mail.ru, 54081@mail.ru

Ключевые слова:

планирование дорожной сети,
риски чрезвычайных ситуаций,
прогнозирование вреда,
геоинформационные технологии.

При описании чрезвычайной ситуации (ЧС) природного характера как случайного процесса главную трудность составляет большое число параметров, которые должны быть количественно оценены. Предложено рассматривать проявление ЧС как реализацию дискретной случайной величины; каждой возможной реализации соответствует определенный размер ожидаемого вреда для объектов транспортной инфраструктуры. На основе анализа результатов инженерно-экологических изысканий с использованием геоинформационных технологий определены ожидаемая вероятность возникновения и размеры ежегодного вреда для 10 видов ЧС на перспективной (до 2030 г.) сети автодорог ГК «Автодор».

1. Введение

Чрезвычайные ситуации (ЧС) природного и техногенного происхождения неизбежно связаны с нарушением нормального режима жизнедеятельности, разрушением инфраструктуры, нанесением вреда здоровью и созданием угрозы для жизни людей. Ежегодные расходы на ликвидацию только наиболее острых последствий ЧС составляют в России, по оценкам 2013 г., 224,4 млрд руб. [1].

В предлагаемых различными исследователями методах оценки и прогнозирования вреда от ЧС можно выделить два основных направления. Первое не предполагает формализованного описания процессов ЧС и основано на построении многоаспектных экономико-математических моделей, в которых прогнозирование вреда основывается на статистических данных о вреде за прошлые периоды [2–4]. При этом повышение точности прогноза достигается либо за счет использования статистических методов, наиболее эффективных при решении конкретных задач [5–7], либо в результате учета особенностей отдельных видов ЧС [8]. Вторая группа методов оценки и прогнозирования вреда основана на формальных вероятностных моделях, в которых в явном виде присутствуют параметры

риска (вероятности) возникновения ЧС [9, 10]. Подобный подход позволяет более адекватно описывать процессы неблагоприятных природных явлений, в том числе с учетом особенностей их отдельных видов. В то же время возникают дополнительные трудности по количественной оценке параметров, входящих в вероятностные модели. Особенно заметно эти трудности проявляются при рассмотрении больших территорий, в пределах которых характер проявления ЧС существенно различается, а значит, различны и значения параметров в их формализованном описании. Особенности определения вреда для линейных и пространственно-распределенных объектов рассмотрены, например в [11–14].

Планирование ресурсов (в том числе финансовых) для ликвидации последствий ЧС требует соответствующего научного обоснования, учитывающего их явно выраженный вероятностный характер. Создание финансовых и экономических инструментов, направленных на возмещение вреда, рассмотрено в [15–18]; при этом прогнозный вред определяется на региональном уровне, на основе укрупненных статистических данных и без разделения ЧС по отдельным видам.

В настоящей работе представлена методика, позволяющая количественно оценивать риски возникновения различных видов ЧС природного характера и прогнозировать наносимый ими вред объектам транспортной инфраструктуры, а также приведены результаты реализации этой методики применительно к перспективной сети дорог ГК «Автодор».

2. Теоретический анализ

Основополагающий принцип: все рассматриваемые природно-климатические явления и процессы, происходящие вблизи автомобильных дорог, носят явно выраженный случайный характер, с варьируемыми в весьма широких пределах масштабом и частотой проявления. Также принимается, что размер годового вреда дорожным объектам является по своей природе случайной величиной. Закон и параметры распределения этой случайной величины зависят как от параметров вызывающих вред случайных процессов, так и от относительно хорошо детерминированных инженерно-технологических факторов — конфигурации дорожной сети, конструкции дорожной одежды, инженерного устройства. Поэтому моделирование и прогнозирование чрезвычайных ситуаций основывается на методах математического описания случайных процессов. К основным параметрам, используемым для описания ЧС как случайного процесса, относятся:

- интервал времени Δt , в течение которого оценивается вероятность наступления ЧС с определенными характеристиками;
- вид ЧС, соответствующий определенному индексу k ;
- интенсивность события M_k (для каждого вида ЧС единицы измерения его интенсивности выбираются индивидуально и являются, в общем случае, независимыми, как и шкалы их представления — нормальная, логарифмическая и т.д.);
- количество событий N_k , наступление которых считается возможным за период Δt , и вероятность наступления которых оценивается.

Отказавшись от детального рассмотрения развития конкретного события во времени (ограничившись оценкой вероятности факта наступления такого события и используя для его характеристики максимальную интенсивность изменения определяющих показателей), для каждого вида ЧС получим двумерное пространство состояний (фазовое пространство), измерениями которого являются M_k и N_k . Это пространство состояний смешанного вида: вдоль измерения M_k оно непрерывное ($0 \leq M_k \leq \infty$), а вдоль N_k — дискретное ($N_k = 0, 1 \dots \infty$). Кроме того, случайные параметры M_k и N_k , очевидно, не являются независимыми. Следовательно, для описания их взаимодействия целесообразно использовать двумерную

случайную величину, характеризуемую функцией совместной плотности вероятностей $p_k(M_k, N_k)$.

С учетом вышесказанного, считая случайный процесс многомерным (по количеству учитываемых видов ЧС) и полагая $\Delta t = t - t_0$, можно представить общее формализованное описание процесса в виде:

$$V(t) = \{V_1(M_1, N_1, t), V_2(M_2, N_2, t), \dots, V_K(M_K, N_K, t)\}. \quad (1)$$

При использовании (1) вероятность возникновения ЧС определенного вида определяют с помощью сечений соответствующей функции $V_k(M_k, N_k, t)$ при зафиксированных значениях t . Поскольку каждое такое сечение есть плотность распределения двумерной случайной величины $p_{k,t}(M_k, N_k)$, вероятность возникновения события интенсивностью $x_{\min} \leq M_k \leq x_{\max}$ ровно z раз в течение промежутка времени $\Delta t = t - t_0$ составляет:

$$v_k(x_{\min}, x_{\max}, z, \Delta t) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} p_{k,t}(x, z) dx. \quad (2)$$

Главной трудностью, сдерживающей практическое использование выражения (1) при оценке вероятностей возникновения ЧС, является большое количество параметров в функциях $V_k(M_k, N_k, t)$. Например, широко используемое в аналогичных задачах нормальное распределение основано на количественном определении двух параметров (среднего значения $M_{k,N}$ и стандартного отклонения $\sigma_{k,N}$), соответственно, общее количество параметров для ЧС одного вида равно $2N_{k,\max}$ (где $N_{k,\max}$ — наибольшее количество событий, предполагаемых возможными в течение периода Δt). Очевидно, что с возрастанием рассматриваемого периода времени $N_{k,\max} \rightarrow \infty$ проблема количественной оценки параметров функции V_k становится трудноразрешимой. Кроме того, параметры V_k , очевидно, зависят от времени (например, среднее значение $M_{k,N}(t)$ является возрастающей функцией, поскольку с ростом Δt возрастает и вероятность проявления ЧС повышенной интенсивности). Это автоматически относит выражение (1) к классу нестационарных процессов и еще более усложняет процедуру количественного описания его параметров.

Существенно упростить вычислительную процедуру можно путем фиксации периода времени Δt , оценивая вероятность проявления единственного события ($N_k = 1$) и предполагая независимость событий. В этом случае параметры V_k перестают зависеть от времени (процесс становится стационарным) и кардинально сокращается их количество. Переход к периодам произвольной продолжительности Δt

($y = 1, 2, \dots, \infty$) и количеству событий z в течение этого периода осуществляется на основе:

$$P_{z,y} = \frac{y!}{z!(y-z)!} P_{1,1}^z (1 - P_{1,1})^{y-z}, \quad (3)$$

где $P_{1,1}$ — вероятность проявления события (ЧС определенного вида и интенсивности) в течение интервала времени Δt , определяется с помощью (2) при $z = 1$;

$P_{z,y}$ — вероятность проявления z событий в течение периода $y\Delta t$.

При определении величины возможного вреда от ЧС необходимо располагать данными о среднестатистических величинах вреда $C_k(M)$, имеющего место при возникновении события k -го вида с интенсивностью M_k . Тогда общий ожидаемый вред в течение прогнозного периода $y\Delta t$ (от всех учитываемых видов ЧС) будет равен:

$$U = \sum_{k=1}^K y \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C_k(M) P_k(M) dM}{\int_{-\infty}^{\infty} C_k(M) dM}. \quad (4)$$

Поскольку представить функцию $C_k(M)$ в явном виде, пригодном для использования в (4), на практике затруднительно, целесообразно для каждого вида ЧС разбить весь возможный диапазон M_k на ограниченное количество интервалов B_k (4–6 интервалов), что будет означать переход от непрерывного описания процесса ЧС к дискретному. В результате такого преобразования каждое событие — проявление ЧС k -го вида в течение периода Δt — может быть формализованно представлено как матрица S_k :

$$S_k = \begin{pmatrix} M_{k,1} & M_{k,2} & \dots & M_{k,B_k} \\ P_{k,1} & P_{k,2} & \dots & P_{k,B_k} \\ C_{k,1} & C_{k,2} & \dots & C_{k,B_k} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $M_{k,i}$ — количественная характеристика для i -го интервала возможной интенсивности ЧС k -го вида; в качестве такой характеристики может использоваться максимальное, либо среднее значение интенсивности в данном интервале;

$P_{k,i}$ — вероятность проявления в течение периода Δt ЧС k -го вида с количественной характеристикой $M_{k,i}$;

$C_{k,i}$ — ожидаемый вред от проявления ЧС с характеристикой $M_{k,i}$.

Поскольку проявления ЧС с характеристиками $M_{k,1} - M_{k,B_k}$ можно рассматривать как отдельные события, несовместные и образующие полную группу (иными словами, для любого k справедливо условие $\sum P_{k,i} = 1$), общий ожидаемый вред от всех видов ЧС за период $y\Delta t$ можно определить по формуле:

$$U = \sum_{k=1}^K \left(y \sum_{i=1}^{B_k} P_{k,i} C_{k,i} \right) = y \sum_{k=1}^K U_k, \quad (6)$$

где U_k — средний прогнозируемый вред за период Δt от ЧС k -го вида, учитывающий все возможные его интенсивности и вероятности их проявления.

Зависимости (1)–(6) положены в основу методики количественной оценки рисков ЧС и прогнозируемых размеров вреда от их наступления. Практическая реализация методики применительно к сети дорог Государственной компании «Российские автомобильные дороги» (ГК Автодор) изложена далее.

Необходимо особо отметить, что получаемые в результате значения U являются оценкой усредненного значения вреда как случайной величины, понимаемая под периодом усреднения бесконечно большой период времени. При этом вполне возможна (а для редких явлений, таких, как землетрясения, и заранее предполагается) ситуация, когда в течение ограниченного планового периода определенное явление (и связанный с ним вред) не будут наблюдаться ни разу. Однако данное обстоятельство не может служить критерием некорректности полученных прогнозных результатов. В то же время имеется отличная от нуля вероятность превышения частот (и общего размера вреда) от отдельных природно-климатических явлений в течение того же планового периода. Подобная картина обусловлена особенностями проявления (реализации) случайных величин.

3. Практическая реализация

При использовании формулы (6) на территории размещения перспективной сети дорог ГК «Автодор» (Европейская часть Российской Федерации) предполагается наличие неизменных природно-климатических и инженерно-инфраструктурных условий в период до 2030 г., определяющих вероятность возникновения ЧС и вызываемый ими вред. В противном случае территорию необходимо разбивать на отдельные участки, для каждого из которых рассматриваются все возможные виды ЧС природного характера, а все элементы S_k считаются неизменными.

Перспективная сеть автодорог ГК «Автодор» отличается значительной протяженностью (до 18 тыс. км к 2030 г. по инновационному сценарию развития, на территории 42 субъектов Российской Федерации). Это делает целесообразным использование геоинформационных технологий и создание специализированной геоинформационной системы как инструмента практической реализации методики и получения количественных оценок уровней риска и ожидаемого вреда от ЧС природного характера. Эффективность применения многоаспектных информационных систем

для решения задач мониторинга и прогнозирования неблагоприятных природных явлений показана в [19–22]. Применительно к рассматриваемой задаче к наиболее важным и востребованным возможностям геоинформационных технологий относятся:

- наличие средств для обработки пространственно-координированных данных, что позволяет использовать большие массивы существующих картографических материалов, отражающих природно-климатические и инженерно-инфраструктурные особенности территории;
- возможность выполнения как базовых операций гео моделирования (агрегирование данных, геокодирование, определение буферных зон, оверлейные операции), так и построения на их основе многоэтапных процедур сетевого анализа дорожной сети, редактирования и формирования топологических и атрибутивных массивов пространственно-координированных данных, в том числе программным путем по заранее определенным алгоритмам;
- широкие возможности по визуализации полученных результатов, их отображению с максимальной информационной насыщенностью, с привязкой к конкретным участкам дорожной сети.

Некоторые общие вопросы типизации неблагоприятных природных явлений рассмотрены в [23,

24]. Виды ЧС, для которых был оценен риск проявления и определен прогнозный вред применительно к перспективной дорожной сети ГК «Автодор», приведены в табл. 1. Критериями для включения определенного вида ЧС в приведенный перечень были, во-первых, степень его опасности и распространенности, во-вторых, наличие необходимых картографических и статистических данных для количественной оценки риска возникновения ЧС.

Фактографической основой для формирования информационных слоев ГИС, используемых для оценки интенсивности отдельных видов ЧС на территории расположения дорожной сети ГК «Автодор», служили карты районирования территории России по уровням опасности различных видов ЧС, карты, схемы распространенности и статистические данные об отдельных видах опасных явлений, космические снимки территории и результаты их дешифрирования и другие материалы, обычно получаемые на стадии инженерно-экологических изысканий при проектировании линейных объектов. С использованием геоинформационных технологий выполнено разбиение перспективной сети ГК «Автодор» на участки в соответствии с уровнем средней прогнозной интенсивности ЧС природного характера. Результаты разбиения дорожной сети по уровням риска наводнений и возникновения придорожных пожаров показаны на рис. 1 и 2 соответственно (см. с. 3 обложки).

Многообразие параметров, необходимых для исчерпывающего формального описания исходных природно-климатических процессов, в сочетании с заведомой неполнотой фактической информации о количественных значениях этих параметров, не позволяют использовать выражения (2) и (4) для прогнозирования вероятности наступления и оценки разрушительных последствий таких процессов. Оценка предполагаемого вреда и, соответственно, базовых (экспертных) оценок вреда U_k для началь-

Таблица 1
Природные явления, приводящие к чрезвычайным ситуациям, для которых определены риски возникновения и размеры прогнозного вреда

k	Природное явление	Характеристика интенсивности	Количество интервалов B_k
1	Землетрясения	Расчетная интенсивность сейсмических воздействий согласно ОСР-97-А	6
2	Лесные пожары	Площадь придорожных территорий, на которой наблюдается данный вид ЧС за 1 среднестатистический год	6
3	Наводнения	Площадь придорожных территорий, на которой данные процессы наблюдались	4
4	Геокриологические процессы	Площадь придорожных территорий, на которой распространены породы, способствующие возникновению ЧС	6
5	Карстовые явления	Площадь придорожных территорий, на которой распространены породы, способствующие возникновению ЧС	4
6	Просадочные процессы		4
7	Оползни		6
8	Сели		4
9	Гололедно-изморозевые явления	Среднестатистическое количество явлений за 1 год	4
10	Осадки повышенной интенсивности		4

Таблица 2
Базовые экспертные оценки вреда по отдельным видам ЧС, используемые в (6)

k	Вид ЧС	U_k , тыс. руб./км в год
1	Землетрясения	5
2	Лесные пожары	4
3	Наводнения	15
4	Геокриологические процессы	1
5	Карстовые явления	20
6	Просадочные процессы	10
7	Оползни	1
8	Сели	4
9	Гололедно-изморозевые явления	1
10	Осадки повышенной интенсивности	1

ного (нижнего) уровня опасности по каждому виду природно-климатического явления осуществляется по формуле (6), с одновременным построением для каждого вида явления своей шкалы соответствия между уровнем опасности и размером вреда. В настоящей работе использованы шкалы, основанные на геометрической прогрессии, со знаменателем 2 и базовой экспертной оценкой (табл. 2) в качестве основания.

4. Результаты и их обсуждение

Общая протяженность участков дорожной сети, находящихся в зонах риска возникновения ЧС, приведена в табл. 3. Наиболее распространенными видами ЧС, имеющими высокий риск возникновения (уровни с 4 по 6 при 6-диапазонной шкале, и уровни 3–4 при 4-диапазонной), являются *гололедно-изморозевые явления*, а также *наводнения и подтопления* дорожных объектов.

Таблица 3

Прогнозирование риска ЧС в процессе развития дорожной сети ГК «Автодор»

Вид и уровень риска	Протяженность автодорог в зонах риска ЧС по годам проекта, км					Вид и уровень риска	Протяженность автодорог в зонах риска ЧС по годам проекта, км				
	2015 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г., при сценарии			2015 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г., при сценарии	
				базовом	оптимистичном					базовом	оптимистичном
<i>Землетрясения</i>						Уровень 3	789	789	789	1 330	1 781
Уровень 1	37	37	843	1 263	1 324	Уровень 4	185	549	1 385	1 743	1 990
Уровень 2	185	185	398	469	594	<i>Просадочные процессы</i>					
Уровень 3	75	75	75	93	93	Уровень 1	808	1 081	1 690	2 918	4 298
Уровень 4	22	22	22	51	51	Уровень 2	428	428	2 084	3 814	5 169
Уровень 5	0	0	0	502	502	Уровень 3	443	443	586	1 565	1 797
Уровень 6	0	0	0	0	0	Уровень 4	339	339	339	610	610
<i>Лесные пожары</i>						<i>Оползни</i>					
Уровень 1	511	511	801	899	1 871	Уровень 1	668	824	1 262	2 935	5 061
Уровень 2	117	117	481	725	1 289	Уровень 2	303	390	1 023	1 880	2 996
Уровень 3	92	92	92	325	483	Уровень 3	1 606	1 727	2 907	5 388	7 331
Уровень 4	68	68	229	620	1 135	Уровень 4	177	177	268	926	1 192
Уровень 5	96	201	283	498	990	Уровень 5	45	45	510	934	1 118
Уровень 6	132	132	290	458	850	Уровень 6	0	0	0	0	0
<i>Наводнения</i>						<i>Сели</i>					
Уровень 1	193	193	604	1 506	1 506	Уровень 1	0	0	0	0	0
Уровень 2	867	1 094	2 621	3 573	6 524	Уровень 2	0	0	0	0	0
Уровень 3	1 508	1 645	2 087	6 196	8 346	Уровень 3	0	0	0	0	53
Уровень 4	230	230	659	788	1 323	Уровень 4	0	0	0	138	138
<i>Геокриологические процессы</i>						<i>Гололедно-изморозевые явления</i>					
Уровень 1	581	581	936	1 405	1 647	Уровень 1	0	0	0	0	0
Уровень 2	889	889	2 922	6 569	8 385	Уровень 2	532	532	2 193	5 039	8 266
Уровень 3	1 133	1 497	1 917	2 997	6 110	Уровень 3	2 267	2 630	3 778	7 024	9 432
Уровень 4	196	196	196	1 093	1 556	Уровень 4	0	0	0	0	0
Уровень 5	0	0	0	0	0	<i>Осадки повышенной интенсивности</i>					
Уровень 6	0	0	0	0	0	Уровень 1	0	0	1 100	2 401	3 693
<i>Карстовые явления</i>						Уровень 2	2 082	2 082	3 792	6 898	11 240
Уровень 1	43	43	43	430	430	Уровень 3	716	1 080	1 080	2 765	2 765
Уровень 2	681	681	744	1 489	2 466	Уровень 4	0	0	0	0	0

На рис. 3 (см. с. 3 обложки) показана нумерация участков дорожной сети ГК «Автодор», используемая при определении прогнозного вреда от отдельных видов природно-климатических явлений. Приведенная на рис. 3 дорожная сеть отражает результаты реализации инновационного сценария развития сети по состоянию на 2030 г.; инерционный сценарий развития к 2030 г. ограничен участками 2–17.

Прогнозируется, что к 2030 г. при реализации инерционного сценария в зоне высокого риска возникновения ЧС в результате гололедно-изморозевых явлений, а также наводнений и подтоплений будет находиться соответственно 58,2 и 57,9% дорожной сети.

Наименее распространенными видами аномальных природных явлений в прогнозный период будут образование селей (1,1% дорожной сети), разрушительные землетрясения (4,6%) и геокриологические процессы (9,1%). Для карстовых явлений наиболее уязвимы участки 8, 13 и 5, для которых ежегодный расчетный вред составляет 70 млн руб., 66 млн руб. и 58 млн руб. соответственно. В целом для дорожной сети средний ежегодный вред прогнозируется на уровне 550 млн руб. в ценах 2014 г.

Среднегодовой расчетный вред от *просадочных явлений* составляет 265 млн руб., что примерно в 2 раза ниже прогнозируемого вреда от *карстовых явлений*. Наибольший прогнозный вред получен для участков 10, 14 и 19 (56 млн руб., 39 млн руб. и 32 млн руб. соответственно). В то же время на двух участках (11 и 15) опасность просадки грунта и, соответственно, прогнозируемый вред отсутствуют; на участках 4 и 16 прогнозный вред составляет менее 1 млн руб. в год, а еще на 4 участках (1, 5, 21, 22) — менее 3 млн руб. Это свидетельствует о неравномерном распределении данного вида опасности по территории расположения дорожной сети и необходимости детально обследовать наиболее опасные участки сети при проведении инженерно-экологических изысканий с целью уточнения прогнозных значений вреда.

Опасность возникновения на дорожной сети аварийных ситуаций, обусловленных *геокриологическими процессами*, заметно ниже, чем от карстовых и просадочных явлений. Это связано с большим опытом строительства и эксплуатации различных объектов в криолитозоне, накопленном в России и позволяющем выбирать и реализовывать инженерно-технические решения, учитывающие геокриологические особенности территории и тем самым минимизирующие возможный вред от развития данных процессов. При этом имеет место неравномерное распределение прогнозируемого вида вреда по территории. Наибольший среднегодовой вред предполагается на участках 17 и 18 (свыше 8 млн руб. в

год), в то же время на сопоставимом с ними по длине участке 19 расчетный вред составляет менее 5,5 млн руб., а на участках 10 и 14 — около 3,5 млн руб.

Большая часть территории дорожной сети находится в зоне умеренного риска возникновения *оползней*, с отдельными участками повышенной и высокой опасности разрушения дорожных объектов. Общий ожидаемый ежегодный вред от данного природного явления для всей дорожной сети составляет 67,8 млн руб., что сопоставимо с вредом от геокриологических проявлений. Наиболее опасным является участок 10, где расчетный вред превышает 9 млн руб. в год. Также высокий вред (5–6 млн руб.) прогнозируется на участках 9, 14, 16, 18 и 19. Сравнительно низким риском возникновения оползней характеризуются участки 5 и 22, где вред составляет менее 1 млн руб. ежегодно.

С точки зрения опасности возникновения *селей*, в зоне риска находится около 10% территории расположения перспективной дорожной сети ГК «Автодор». Наиболее опасные участки расположены на Северном Кавказе. Для участка 16 среднегодовое значение данного вида вреда около 3,8 млн руб.; подверженные селевой опасности участки 21 и 10 характеризуются ожидаемыми значениями вреда 0,8 и 0,6 млн руб. в год. При этом данные затраты подразумевают не только восстановление поврежденного селями дорожного полотна, но и реализацию противоселевых мероприятий. Суммарный вред от возникновения селей по всей дорожной сети составляет 5,3 млн руб. ежегодно, что значительно ниже ожидаемого вреда от остальных природных явлений. Это объясняется малой долей селеопасных участков на сети ГК «Автодор».

Землетрясения являются одним из наиболее разрушительных видов природных катастроф с точки зрения размеров наносимого вреда. Одновременно необходимо учитывать, что разрушительные землетрясения на той или иной конкретной территории достаточно редки, вероятность их ежегодного возникновения значительно ниже 1. Это дает основания отнести удельный вред от возникновения землетрясений к уровню, промежуточному между вредом от часто наблюдаемых природных явлений (наводнения, просадки грунта, карст) и вредом от более редких и менее масштабных причин (геокриологические процессы, оползни, сели). Общая величина среднегодового вреда для всей дорожной сети составляет 56 млн руб., что сопоставимо с ожидаемым вредом от оползней и геокриологических процессов.

Природные явления, сопоставимые с землетрясениями по своим разрушительным последствиям, но отличающиеся значительно более частыми проявлениями, — это *наводнения и подтопления*. В силу

высокой разрушительной способности и частой повторяемости наводнения и подтопления вызывают среднегодовой вред, наибольший среди всех рассматриваемых природных явлений. Для дорожной сети этот расчетный вред составляет 887 млн руб. в год.

Ливни (сильные дожди) — метеорологическое явление, область распространения и частота возникновения которого значительно превосходят аналогичные показатели остальных природных явлений. Вред, наносимый ливневыми дождями, обусловлен как возрастанием вероятности дорожно-транспортных происшествий, так и возможным инициированием таких опасных процессов и явлений, как дождевые паводки и наводнения, эрозия речных берегов и русел вблизи мостов и т.д. В силу распространенности данного явления ему подвержены все участки, хотя и в разной степени: вред варьирует от 0,7 до 10,6 млн руб. (для участков 22 и 14 соответственно). Общий ежегодный вред по всей дорожной сети составляет 87 млн руб.

Гололедно-изморозевые явления приводят к вреду, связанному как с повышением частоты дорожно-транспортных происшествий (при отложении льда и изморози на дорожном покрытии), так и с увеличением вероятности выхода из строя конструкций инженерных сооружений (проводов, опор линий электропередач, мостовых опор и т.д.) при увеличении нагрузки на них вследствие ледяных отложений. В силу повсеместной распространенности рассматриваемого явления вызываемый им общий расчетный вред для всей дорожной сети составил 110 млн руб. в год. В целом, неблагоприятные метеорологические явления (ливни, гололед и изморозь) наносят ежегодно вред в размере 200 млн руб., что сопоставимо с вредом от просадки грунта.

Около 12% всех перспективных дорог ГК «Автодор» будет проходить по землям с высоким риском *придорожных пожаров*. Размер вреда, наносимого придорожными пожарами, зависит как от их масштабов, так и от типа преобладающей лесной растительности. Общий среднегодовой вред по всей дорожной сети оценивается в размере 278 млн руб., при этом более 30% общего вреда (88 млн руб.) ожидается в пределах участка 18, имеющего протяженность свыше 2 тыс. км и проходящего через большое количество лесных массивов. Также значительный систематический вред от придорожных лесных пожаров прогнозируется на участках 17 (53 млн руб.) и 4 (40 млн руб.). Участки, проходящие по безлесным территориям, отличаются незначительными размерами ожидаемого вреда (менее 1 млн руб. в год на участках 2, 3, 13, 14, 16, 22). В целом, размер данного вида вреда уступает только вреду от наводнений и карстовых явлений.

С учетом всех видов неблагоприятных природно-климатических явлений общий вред для дорожной сети ГК «Автодор» (инновационный сценарий развития по состоянию на 2030 г.) прогнозируется на уровне 2,38 млрд руб. в год. Наибольшие расчетные значения получены для участков 18 (277 млн руб.), 19 (216 млн руб.) и 10 (215 млн руб. в год). Максимальный удельный вред (на 1 км дороги) прогнозируется на участках 15 (240 тыс. руб., высокая пожароопасность и вероятность наводнений), 5 и 16 (249 и 253 тыс. руб. соответственно, распространены карстовые явления и высока вероятность наводнений). Наименее подвержены вреду от неблагоприятных природно-климатических явлений участки 11 (48 тыс. руб.) и 9 (85 тыс. руб. на 1 км в год).

С учетом планового развития дорожной сети приведена детальная погодная роспись оценок ожидаемого вреда от реализации рисков природно-климатических явлений, с учетом аннуитетной капитализации ожидаемого эффекта 2030 г. для учета рисков в постпрогнозный период (табл. 4).

Дисконтирование ожидаемых ежегодных оценок вреда от наступления природно-климатических явлений по хозяйственной ставке дисконтирования

Таблица 4

Ожидаемый вред от наступления неблагоприятных природно-климатических явлений за прогнозный период развития дорожной сети

Год	Недисконтированный вред в ценах 2014 г., млн руб./год, по сценарию		Дисконтированный вред при ставке 7%, млн руб./год, по сценарию	
	инерционному	инновационному	инерционному	инновационному
2015	386	386	361	361
2016	422	422	369	369
2017	440	440	359	359
2018	458	458	350	350
2019	477	477	340	340
2020	477	477	318	318
2021	637	711	397	443
2022	717	828	417	482
2023	797	945	434	514
2024	878	1 062	446	540
2025	878	1 062	417	505
2026	1 189	1 590	528	706
2027	1 345	1 853	558	769
2028	1 501	2 117	582	821
2029	1 656	2 381	600	863
2030	1 656	2 381	8 015 *	11 522 *
ВСЕГО ожидаемый вред от природно-климатических рисков			14 490	19 260

* Для получения указанных значений применялась процедура отсроченной аннуитетной капитализации без роста.

(7%) позволяет дать капитализированную оценку рассматриваемой группы природных рисков в 14,5–19,3 млрд руб. Статистически, сформированный резервный фонд такого объема, вложенный в инструменты с ежегодной (реальной) доходностью, соответствующей примененной ставке дисконтирования, может стать источником финансирования работ по ликвидации последствий рассмотренных групп природных рисков.

5. Заключение

Риски возникновения ЧС природного характера необходимо обязательно учитывать при прогнозировании развития дорожной сети России. Большое разнообразие природно-климатических условий и, как следствие, недостаточность многолетних статистических данных не позволяет непосредственно использовать строгие математические модели для количественной оценки рисков (определения вероятности возникновения ЧС различных видов и ин-

тенсивность их проявления). В связи с этим более рационально описать неблагоприятные природно-климатические явления в дискретной форме, как полные группы событий, с последующим определением (назначением экспертным путем) для каждого такого события величины ожидаемого вреда.

Управление природными рисками в соответствии с наилучшей международной практикой может осуществляться путем создания общих или целевых резервных фондов, аккумулирующих средства на предотвращение последствий реализации таких рисков. Среднее ожидание рисков (в денежной форме) может влиять на операционные показатели деятельности и выступать для эксплуатирующих организаций отрицательным коммерческим эффектом (затратами). Полученная в настоящей работе капитализированная оценка вреда от реализации природных рисков рассматривается как эффект, который в дальнейшем рекомендуется учитывать при проведении полного анализа «затраты–выгоды».

Литература

1. О результатах и основных направлениях деятельности МЧС России на 2014 год и плановый период 2015–2016 гг. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.mchs.gov.ru/activities/results/Doklad_o_rezultatah_i_osnovnih_napravlen (дата обращения 21.04.2015).
2. *Авдоткин В.П., Дзыбов М.М., Самсонов К.П.* Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. — М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), — 2012.
3. *Самсонов К.П., Авдоткин В.П., Радецкий А.В. и др.* Методология оценки экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. — М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. — С. 414–420.
4. *Вакарев А.А.* Методические подходы к определению экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций для региональной экономики // Вестн. Волгоградского гос. ун-та, сер. 3. Экономика. Экология. 2011; 1: 54–60.
5. *Плющиков В.Г., Фатиев М.М.* Статистические методы оценки и прогнозирования экономического ущерба от природных чрезвычайных ситуаций // Вестн. Росс. ун-та дружбы народов. Сер. Агрономия и животноводство. 2012; 2: 5–15.
6. *Радаев Н.Н.* Повышение точности прогноза вероятности катастроф за счет учета неоднородных статистических данных по ущербу // Автоматика и телемеханика. 2000; 3: 183–189.
7. *Решетников В.А.* Прогнозирование экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций // Инновационное реформирование экономики и общества в условиях глобальной нестабильности. Саратов: ООО «Институт исследований и развития профессиональных компетенций», 2015. С. 187–190.
8. *Подрезов Ю.В.* Прогнозирование экономического и социально-экологического ущерба от чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Проблемы правовых и экономических способов предупреждения и минимизации вреда, возникающего в условиях чрезвычайных ситуаций. — М.: ИИЦ ВНИИ ГОЧС, 2000. — С. 300–304.
9. *Александров А.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.* Единая методология анализа риска чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015; 1: 113–132.
10. *Черных Г.С.* Формирование результатов информационного обеспечения принятия решения на ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций с использованием методов нечеткого моделирования // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2012; 1: 70–75.
11. *Шевченко А.И.* Оценка устойчивости перевозочного процесса // Мир транспорта. 2013; 5: 136–143.
12. *Шевченко А.И.* Предупреждение и оценка стихийных бедствий // Мир транспорта. 2013; 4: 138–145.
13. *Наумов И.С.* Методика обоснования оптимального состава ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций на пространственно распределенных объектах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011; 5: 145.
14. *Наумов И.С.* Поиск и управление оптимальным составом ресурсов на пространственно распределенных объектах при возникновении чрезвычайных ситуаций //

- Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер. Экономика и управление. 2011; 2: 12–19.
15. Акимов В.А., Тимофеева Т.Б., Лесных В.В. Проблема выбора оптимальной структуры национальной системы возмещения ущерба от природных и техногенных чрезвычайных ситуаций // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2006; 6: 3–10.
 16. Лесных В.В., Тимофеева Т.Б. Национальная система возмещения ущерба, вызванного природными и техногенными ЧС: подходы, моделирование, оптимизация // Проблемы анализа риска. 2004; 1: 50–55.
 17. Рожков Р.С. Природный и техногенный риск: анализ, оценка, страхование от ущерба // Экономика и предпринимательство. 2013; 3: 398–401.
 18. Наумов И.С. Модель функционирования системы обеспечения ресурсами для ликвидации чрезвычайных ситуаций // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011; 1: 202–208.
 19. Волосухин Я.В. Геоинформационная система для обеспечения безопасности гидротехнических сооружений на уровне субъекта РФ // Мониторинг. Наука и безопасность. 2014; 2: 32–41.
 20. Аверченков В.И., Леонов Е.А., Шкаберин В.А. и др. Разработка аналитической системы мониторинга бассейнов открытых водоемов и противопаводкового предупреждения // Фундаментальные исследования. 2014; 12–1: 13–19.
 21. Горбунов В.С., Макиев Ю.Д., Малышев В.П. Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Технологии гражданской безопасности. 2012; 1: 70–79.
 22. Фролов Д.С. Информационно-аналитический комплекс прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций как элемент единой системы поддержки принятия решений при управлении регионом // Информатизация и связь. 2011; 4: 69–71.
 23. Якубович И.А., Ерофеев Г.В. Потенциальные источники возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера // Вестн. Северо-Восточного гос. ун-та. 2006; 7–2: 131–135.
 24. Мухин В.И., Шимитило В.Л. Типизация источников чрезвычайных ситуаций гидрологического характера // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2010; 2: 70–73.

References

1. *O rezul'tatah i osnovnyh napravlenijah dejatel'nosti MChS Rossii na 2014 god i planovyyj period 2015–2016 gg.* [On results and main directions of activities of EMERCOM of Russia for 2014 and the planning period of 2015–2016]. Available at: http://www.mchs.gov.ru/activities/results/Doklad_o_rezultatah_i_osnovnih_napravljen (accessed 21 April 2015) (in Russian).
2. Avdot'in V.P., Dzybov M.M., Samsonov K.P. *Ocenka ushherba ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera* [Assessment of damage from emergency situations of natural and technogenic character]. Moscow, FGBU VNII GOChS (FC) Publ., 2012. 468 p (in Russian).
3. Samsonov K.P., Avdot'in V.P., Radeckij A.V., Shirokov K.A., Avdot'ina Ju.S. The methodology for estimating the economic damage from emergency situations of natural and technogenic character. *Problemy zashhity naselenija i territorij ot chrezvychajnyh situacij* [Problems of protection of population and territories from emergency situations]. Moscow, FGU VNII GOChS (FC) Publ., 2010, pp. 414–420 (in Russian).
4. Vakarev A.A. Methodological approaches to the definition of economic damage from emergency situations to the regional economy. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Jekonomika. Jekologija* [Bulletin of Volgograd state University. Economy. Ecology], 2011, I.1, pp. 54–60 (in Russian).
5. Pljushchikov V.G., Fatiev M.M. Statistical methods for estimating and forecasting economic damages from natural disasters. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Agronomija i zhivotnovodstvo* [Bulletin of the Russian University of friendship of peoples. Agronomy and animal husbandry], 2012, I. 2, pp. 5–15 (in Russian).
6. Radaev N.N. Improving the accuracy of predicting the likelihood of accidents by taking into account heterogeneous statistical data on damage. *Avtomatika i telemehnika* [Automation and remote control], 2000, I.3, pp. 183–189 (in Russian).
7. Reshetnikov V.A. Forecasting economic damages from emergencies. *Innovacionnoe reformirovanieje ekonomiki i obshhestva v uslovijah global'noj nestabil'nosti* [The innovative reform of the economy and society in conditions of global instability]. Saratov, OOO «Institut issledovanij i razvitij professional'nyh kompetencij» Publ., 2015, pp. 187–190 (in Russian).
8. Podrezov Ju.V. Forecasting economic and socio-environmental damage caused by forest fire emergency situations. *Problemy pravovyh i jekonomicheskikh sposobov preduprezhdenija i minimizacii ushherba, vznikajushhego v uslovijah chrezvychajnyh situacij* [Problems of legal and economic methods of prevention and minimisation of damage arising in emergencies]. Moscow, IIC VNII GOChS Publ., 2000, pp. 300–304 (in Russian).
9. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Sushchev S.P.A uniform methodology for risk analysis of emergency situations of technogenic and natural character. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. N. Je. Bauman. Estestvennye nauki* [Bulletin of Moscow state technical University. N. Uh. Bauman. Natural Sciences], 2015, I.1, pp. 113–132 (in Russian).
10. Chernyh G.S. Results formation of information support of the decision on liquidation of consequences of emergency situations using methods of fuzzy modeling. *Strategija grazhdan-*

- skoj zashhity: problem i issledovaniya* [The strategy of civilian protection: issues and research], 2012, I.1, pp. 70–75 (in Russian).
11. Shevchenko A.I. The assessment of the sustainability of the transportation process. *Mir transporta* [World transport], 2013, I.5, pp. 136–143 (in Russian)
 12. Shevchenko A.I. Warning and assessment of disasters. *Mir transporta* [World transport], 2013, I.4, pp. 138–145 (in Russian).
 13. Naumov I.S. Methodology to study the optimal composition of resources for liquidation of emergency situations at spatially distributed sites. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2011, I.5, p. 145 (in Russian).
 14. Naumov I.S. Search and management of the optimum composition of resources in spatially distributed objects in emergency situations. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Jekonomika i upravlenie* [Bulletin of the Volga region state technological University. Economics and management], 2011, I.2, pp. 12–19 (in Russian).
 15. Akimov V.A., Timofeeva T.B., Lesnykh V.V. The problem of choosing the optimal structure of the national system of compensation of damage from natural and man-made emergencies. *Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij* [Security problems and emergencies], 2006, I.6, pp. 3–10 (in Russian).
 16. Lesnyh V.V., Timofeeva T.B. A national system of compensation of damage caused by natural and technogenic emergencies: approaches, modeling, optimization. *Problemy analiza riska* [Problems of risk analysis], 2004, I.1, pp. 50–55 (in Russian).
 17. Rozhkov R.S. Natural and technological risk: analysis, assessment, insurance. *Jekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and entrepreneurship], 2013, I.3, pp. 398–401 (in Russian).
 18. Naumov I.S. The operating model of providing resources for liquidation of emergency situations. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya of the Tula state University. Technical science]. 2011, I.1, pp. 202–208 (in Russian).
 19. Volosuhin Ja.V. Geographic information system for safety of hydraulic structures at the level of subject of the Russian Federation. *Monitoring. Nauka i bezopasnost'* [Monitoring. Science and safety], 2014, I.2, pp. 32–41 (in Russian).
 20. Averchenkov V.I., Leonov E.A., Shkaberin V.A., Kryshnev Ju.V., Zaharenko L.A., Lepih Ja.I. Development of analytical system for monitoring pools of open water bodies and flood warnings. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2014, I.12–1, pp. 13–19 (in Russian).
 21. Gorbunov V.S., Makiev Ju.D., Malyshev V.P. Monitoring and forecasting of emergency situations of natural and technogenic character. *Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Civil security technologies], 2012, I.1, pp. 70–79 (in Russian).
 22. Frolov D.S. Information-analytical complex forecasting of consequences of emergency situations as part of the unified system of decision support in the management region. *Informatizacija i svjaz'* [Informatization and communication], 2011, I.4, pp. 69–71 (in Russian).
 23. Jakubovich I.A., Erofeev G.V. Potential sources of emergency situations of natural character. *Vestnik Severo-Vostochnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the northeastern state University], 2006, I.7–2, pp. 131–135 (in Russian)
 24. Mukhin V.I., Shimitilo V.L. Typification of the sources of emergencies hydrological character. *Nauchnye i obrazovatel'nye problem grazhdanskoj zashhity* [Scientific and educational problems of civil protection], 2010, I.2, pp. 70–73. (in Russian)

A Method of Predicting Risk of Natural Emergencies on Road Network

Yu.V. Trofimenko, Head of Department, Professor, Doctor of Technical Sciences, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University – MADI

A.N. Yakubovich, Professor, Doctor of Technical Sciences, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University – MADI

The main difficulty of describing natural emergency as a random process is the large number of parameters that must be quantified. Authors suggest threatening the onset of emergency as a discrete random variable; each possible implementation corresponds to the defined size of the expected damage to transportation infrastructure. The analysis of the engineering and environmental surveys via geo-information technologies identified expected probability of occurrence and scale of the annual damage for 10 types of emergency situations on long-term (up to 2030) for State Company Russian Highways road network.

Keywords: road network planning, emergencies risk, damage forecasting, GIS technology.