

УДК 519.816

## Моделирование восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба

А. И. Дергачев<sup>1</sup>, О. Н. Куранова<sup>1</sup>, О. А. Степанская<sup>1</sup>, А. К. Черных<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии, Российская Федерация, 198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, 1

**Для цитирования:** *Дергачев А. И., Куранова О. Н., Степанская О. А., Черных А. К.* Моделирование восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 609–617. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-609-617

### Аннотация

**Цель:** Получение аналитических зависимостей для распределения оптимальным образом ресурсов восстановительных поездов различных видов в целях восстановления в минимально возможные сроки железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба. **Методы:** Применяется эвристический метод оптимального распределения ресурсов восстановительных поездов различных видов по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС регионального масштаба. Приведено доказательство оптимальности предложенного эвристического метода. **Результаты:** В рамках предложенного метода выведены новые аналитические зависимости для распределения ресурсов восстановительных поездов различных видов по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС регионального масштаба. Приведены математическая постановка, базирующаяся на постановке нелинейной модели теории исследования операций, а также алгоритм решения задачи распределения ресурса восстановительных поездов по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС регионального масштаба. **Практическая значимость:** На основе рассмотренных зависимостей возможно повышение оперативности расчетов, позволяющих осуществить обоснованное распределение восстановительных поездов различных видов для восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба. Результаты исследования могут быть применены при создании информационно-расчетных систем, оперативно реализующих предложенные аналитические зависимости для более эффективного восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба.

**Ключевые слова:** Ресурсы восстановительных поездов различных видов, модель распределения ресурсов восстановительных поездов различных видов, алгоритм распределения ресурсов, динамика прибытия восстановительных поездов, технологии выполнения работ на железнодорожных объектах.

## Введение

В статье представлена модель распределения ресурса восстановительных поездов (ВП) по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, являющаяся основой предлагаемого метода.

Указанная модель (задача) реализует распределение (оптимальным образом) ресурсов различных видов [1–9].

В отличие от имеющихся решений указанной задачи, как правило, имеющих экспоненциальную трудоемкость, предлагаемое решение учитывает как динамику прибытия ВП, так и технологии выполнения ими необходимых работ на железнодорожных объектах [10, 11], разрушенных в результате ЧС (в дальнейшем объектов).

## Математическая постановка модели

Авторами предлагается следующая математическая постановка модели распределения ресурса восстановительных поездов по разрушенным объектам:

$$\sum_{j \in J} PS_j (d_{\Pi} - t_j^B) \rightarrow \max, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$t_j^B \leq t_j^{\text{дирп}} \text{ при } \forall j \in J, \quad (2)$$

$$t_j^B = \max_{k \in M_{\Pi j}} t_{kj}^B \text{ при } \forall j \in J, \quad (3)$$

$$t_{kj}^B = \max_{r \in R_{rkj}} t_{rkj}^B \text{ при } \forall k \in M_{\Pi j}, \forall j \in J, \quad (4)$$

$$t_{rkj}^B(x_{rkj}) \leq t_j^B \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \forall k \in M_{\Pi j}, \forall j \in J, \quad (5)$$

$$x_{rkj} \leq E_{rkj} \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \forall k \in M_{\Pi j}, \forall j \in J, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in M_{\Pi j}} x_{rkj} \leq Q_r \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \quad (7)$$

$$t_{rkj}^H \geq t_{rsq}^H + \tau_{rsk} \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \forall j, q \in J, \forall k, s \in M_{\Pi j}, \quad (8)$$

где  $J = \{j = \overline{1, |J|}\}$ , где  $|J|$  — мощность множества} — множество коммуникаций;

$PS_j$  — пропускная способность  $j$ -й коммуникации после восстановления, п. п./сут;

$d_{\Pi}$  — порядковый номер, определяемый директивно, последних суток восстановления разрушенных объектов, сутки;

$t_j^B$  — срок восстановления прерванного движения по  $j$ -й коммуникации, сутки;

$t_j^{\text{дирп}}$  — директивный срок восстановления прерванного движения по  $j$ -й коммуникации, сутки;

$t_{kj}^B$  — срок восстановления прерванного движения через  $k$ -й объект  $j$ -й коммуникации, сутки;

$M_{\Pi j}$  — множество разрушенных в  $d$ -е сутки ЧС объектов  $j$ -й коммуникации;

$R_{rkj} = \{\text{земляные } (r=1), \text{путевые } (r=2), \text{мостовые } (r=3)\}$  — множество видов восстановительных работ, на  $k$ -м объекте  $j$ -й коммуникации;

$t_{rkj}^B$  — срок окончания восстановительных работ  $r$ -го вида на  $k$ -м объекте  $j$ -й коммуникации, сутки;

$x_{rkj}$  — количество ВП  $r$ -го вида, закрепленных за  $k$ -м объектом  $j$ -й коммуникации, единиц;

$E_{rkj}$  — фронт восстановительных работ на  $k$ -м объекте  $j$ -й коммуникации  $r$ -го вида, единиц;

$Q_r$  — ресурс восстановительных поездов  $r$ -го вида;

$t_{rkj}^H(t_{rsq}^H)$  — срок начала восстановительных работ  $r$ -го вида на  $k$ -м ( $s$ -м) объекте  $j$ -й ( $q$ -й) коммуникации, сутки;

$\tau_{rsk}$  — продолжительность выполнения восстановительных работ  $r$ -го вида на  $s$ -м объекте  $q$ -й коммуникации восстановительными поездами и маневра их на  $k$ -й объект  $j$ -й коммуникации, сутки.

## Алгоритм реализации модели

Приведем предлагаемый в статье алгоритм модели распределения ресурса восстановительных поездов по разрушенным объектам сети железных дорог произвольной конфигурации.

Шаг 1. Выбор  $k$ -го объекта  $j$ -й коммуникации разрушенного в  $d_m$ -е сутки ЧС —  $O_{kj}$ , за которым закреплены, т. е. выделены на объект, восстановительные поезда. Обозначив через  $M_{zr}$  — множество восстановительных поездов, закрепленных за указанным объектом и выполняющих на нем восстановительные работы  $r$ -го вида.

Тогда для восстановительных работ  $r$ -го вида срок окончания этого вида восстановительных работ (ВР) на  $O_{kj}$  —  $t_{rkj}^{op}$ :

$$t_{rkj}^{op} = \frac{V_{rkj} + \sum_{l \in M_{zr}} \Pi_{rl} \cdot t_{nrp}^{lrkj}}{\sum_{l \in M_{zr}} \Pi_{rl}}, \quad (9)$$

где  $V_{rkj}$  — объем восстановительных работ  $r$ -го вида на разрушенном  $k$ -м объекте  $j$ -й коммуникации (км, м, тыс. м<sup>3</sup>);

$\Pi_{rl}$  — суточные возможности 1-го восстановительного поезда по  $r$ -у виду работ (км, м, тыс. м<sup>3</sup>);  
 $t_{nrp}^{lrkj}$  — срок начала  $r$ -го вида работ  $l$ -го ВП на  $k$ -м объекте  $j$ -й коммуникации, число.

Формула для расчета восстановительных работ  $t_{nrp}^{lrkj}$  имеет вид:

$$t_{nrp}^{lrkj} = \begin{cases} t_{nrp}^{lrkj} + t_{pz}^r & \text{для земляных,} \\ d_m & \text{для мостовых,} \\ t_{nz}^{lkj} + \tau_{пф} & \text{для путевых,} \end{cases} \quad (10)$$

где  $t_{nrp}^{lrkj}$  — срок прибытия 1-го восстановительного поезда, для выполнения  $r$ -го вида ВР на  $O_{kj}$ , число;

$t_{pz}^r$  — продолжительность подготовки восстановительного поезда к выполнению восстановительных работ  $r$ -го вида, число;

$t_{nz}^{lkj}$  — срок начала ЗВР 1-го ВП на  $O_{kj}$ , число;

$\tau_{пф}$  — продолжительность подготовки фронта работ для выполнения ПВР, число.

Заключительным расчетом для  $O_{kj}$  является определение срока восстановления движения через

объект:  $t_{kj}^B = \max_{r \in R_{rkj}} t_{rkj}^{op}$ .

Подобные расчеты необходимо провести для всех объектов, входящих в множество  $M_{пj}$  ( $j \in J, J$  — множество железных дорог (в дальнейшем коммуникаций),  $M_{пj}$  — множество разрушенных в  $d$ -е сутки ЧС объектов  $j$ -й коммуникации), после чего для каждой  $j$ -й коммуникации определяется предварительное значение срока восстановления движения по ней  $t_{kj}^B = \max_{r \in R_{rkj}} t_{rkj}^{op}$ .

*Замечание.* В качестве исходных данных в формуле (9) используются объемы мостовых, путевых и земляных работ при восстановлении объектов сети железных дорог. Однако в модели в качестве исходных данных можно использовать и трудоемкости этих работ.

Шаг 2. Проведение анализа, существуют ли в множестве разрушенных в  $d_m$ -е сутки ЧС объектов  $M_\Gamma = \bigcup_{j \in J} M_{\Gamma j}$  таких, ВП на которые не выделены (не закреплены). Для случая  $M_\Gamma = \emptyset$  необходимо перейти на 4 шаг алгоритма, при  $M_\Gamma = \emptyset$  необходимо перейти на 3 шаг алгоритма.

Шаг 3. В рамках этого шага осуществляется итерационное предварительное закрепление того восстановительного поезда  $r$ -го вида за выбранным по указанному ниже правилу объектом, срок окончания ВР для которого минимален.

Первым (очередным) выбирается объект  $O_{kj}$ , за которым на данной итерации может быть закреплено ВП  $r$ -го вида, удовлетворяющий критерию:

$$t_{rkj}^{op} = \max_{O_{kj} \in M} \max_{r \in R_\Gamma} t_{mst}^{op}. \quad (11)$$

*Замечание.* Расчет  $t_{mst}^{op}$  выполняется с использованием формулы (9). В этой формуле значение  $t_{nrp}^{lrkj}$  будет определено далее по тексту. Следует также отметить, что при  $M_{zr} = \emptyset$  значение  $t_{mst}^{op}$  будем определять по формуле  $t_{mst}^{op} = V_{mst} / A$ , где  $A$ , например 0,1 — малое число.

Закрепление 1-го ВП за  $O_{kj}$  осуществляется при выполнении следующих условий (табл. 1).

Если в множестве  $M_\Gamma$  отсутствуют объекты, которые удовлетворяют условиям 1–4 (табл. 1),

ТАБЛИЦА 1. Условия закрепления ВП за объектами

№ п/п	Формула условия	Значения показателей
1	$t_{rkj}^{\text{оп}} > \max \left\{ t_{пj}^{\text{В}}, \max_{O_{sy} \in M_{\Gamma P}} t_{ms}^{\text{оп}} \right\}$	$M_{\Gamma P}$ — объекты из множества $M_{\Gamma}$ , с предварительно закрепленными на уже проведенных операциях ВП
2	$N_{rkj} + 1 \leq E_{rkj}$	$N_{rkj}$ — число закрепленных предварительно, на проведенных итерациях, за $O_{kj}$ ВП $r$ -го вида, штук
3	$t_{rkj}^{\text{оп}} - t_{нр}^{kj} \geq \tau_r$	$\tau_r$ — минимально допустимая продолжительность выполнения ВР $r$ -го вида на объекте восстановительным поездом 1-го типа, сутки
4	$S_{lkj} \leq S_r^M$	$S_{lkj}$ — расстояние 1-го ВП до $O_{kj}$ , км; $S_r^M$ — суточные возможности по выдвигению к разрушенному объекту ВП $r$ -го вида, км

то итерационное распределение ВП по объектам этого множества завершается.

Последними расчетами, выполняемыми в рамках шага 4, должны быть расчеты для каждой  $j$ -й коммуникации ( $j \in J$ ) срока восстановления движения (сутки):

$$t_j^{\text{В}} = \max \left\{ t_{пj}^{\text{В}}, \max_{O_{\tilde{j}} \in M} \max_{r, \text{вп} \in R} t_{msj}^{\text{В}} \right\}. \quad (12)$$

Введем необходимые для дальнейших расчетов обозначения.

Под множеством  $M_r$  будем понимать множество восстановительных поездов  $r$ -го вида, которые будут закрепляться за определенными выше объектами из множества  $M_{\Gamma}$ . При этом  $M_r$  состоит из двух подмножеств:

$M_r^1$  — подмножество ВП  $r$ -го вида, прибывших в  $d_m$ -е сутки ЧС, причем предполагаем, что каждое из этих ВП прибывает на выбранный в рамках данного шага объект;

$M_r^2$  — подмножество ВП  $r$ -го вида, которые завершили восстановление разрушенных объектов.

Для придания динамики распределению ВП по разрушенным объектам определяем для  $l$ -го ВП ( $l \in M_r^2$ ) продолжительность его маневра на какой-либо  $O_{kj}$  —  $t_{lrkj}^M$ :

$$t_{lrkj}^M = t_{св}^r + (S_{lkj} / V_r) / 24 + t_{рз}^r, \quad (13)$$

где  $t_{св}^r$  — продолжительность свертывания ВП после выполнения  $r$ -го вида работ, сутки;

$S_{lkj}$  — расстояние от  $l$ -го ВП до  $O_{kj}$ , км. В дальнейшем будем предполагать, что  $l$ -е ВП осуществляют маневр на объект  $O_{kj}$  с объекта  $O_{р\gamma}$ ;

$V_r$  — скорость передвижения ВП  $r$ -го вида, км/час.

Введенные выше обозначения позволяют определить  $t_{нр}^{lrkj}$  для  $O_{kj}$  по формуле:

$$t_{нр}^{lrkj} = \begin{cases} d_m + t_{lrkj}^M & \text{для } \forall l \in M_r^2, r \in \{\text{МВР}, \text{ЗВР}\}, \\ t_{нр}^{lrkj} + t_{рз}^r & \text{для } \forall l \in M_r^1, r = \text{ЗВР}, \\ t_{нр}^{lrkj} + t_{рз}^r & \text{для } \forall l \in M_r^1, r = \text{МВР}, \\ t_{р\gamma}^{\text{оп}} + t_{lrkj}^M & \text{для } \forall l \in M_r^2, r \in \{\text{МВР}, \text{ЗВР}\}. \end{cases} \quad (14)$$

*Замечание.* Для ПВР по-прежнему учитываем значение величины  $t_{пф}$ .

Шаг 4. Определение в множестве  $J$   $\gamma$ -й коммуникации такой, что  $V_{\gamma}^{\text{CT}} = \max_{j \in J} (d_{п} - t_j^{\text{В}}) PS_j$ , т. е. такой, пропускная способность которой после восстановления будет максимальной.

Шаг 5. Определение в множестве  $J$   $s$ -й коммуникации такой, что  $V_s^{CT} = \max_{i \in J, i \neq \Gamma} (d_{\Pi} - t_i^B) PS_i$ .

Шаг 6. Выбор  $O_{kj} \in M_{\Pi\gamma}$ , где  $M_{\Pi\gamma}$  — множество разрушенных в  $d_m$ -е сутки ЧС объектов  $\gamma$ -й коммуникации, для которого  $t_{kj}^B = \max_{O_{m\gamma} \in M_{\Pi\gamma}} t_{m\gamma}^B$  и с предварительно закрепленными в рамках шага 3 за ним ВП.

Шаг 7. Выбор  $O_{ps} \in M_{\Pi s}$ , где  $M_{\Pi s}$  — множество разрушенных в  $d_m$ -е сутки ЧС объектов  $s$ -й коммуникации, для которого  $t_{ps}^B = \max_{O_{ms} \in M_{\Pi s}} t_{ms}^B$  и с предварительно закрепленными в рамках шага 3 за ним ВП.

Шаг 8. В случае наличия общих ВП среди тех ВП, которые были предварительно закреплены за  $O_{kj}$  и  $O_{ps}$  переходим на шаг 9, в случае отсутствия общих ВП переходим на шаг 10.

Шаг 9. Выполняем замену по указанному ниже условию, общих ВП на объектах  $O_{kj}$  и  $O_{ps}$  на ВП из множества  $M_r$ .

Выберем объект, на котором необходимо осуществить замену общего ВП. Кандидатом на замену этого общего восстановительного поезда  $r$ -го вида будет  $l$ -й восстановительный поезд, который удовлетворяет условиям 1–4 (табл. 1) шага 3, из множества  $M_r$ , возможности которого максимальны, т. е.  $VZ_{rlkj} = \max_{m \in M_r} \Pi_{rm} (t_{rkj}^{op} - t_{nr}^{mrkj})$ .

После замены общего ВП в множестве  $M_{zr}$  на  $l$ -й восстановительный поезд проведем расчет  $t_{rkj}^{op}$  (формула (9)) и значения  $\bar{t}_r^B = \max\{t_r^B, t_{rkj}^{op}\}$  и  $V_{\Pi}^{нов} = (d - \bar{t}^B) PS$ . Аналогично выполним замену рассматриваемого общего восстановительного поезда на  $O_{ps}$ .

При выполнении условия  $(V_{\gamma}^{CT} - V_{\gamma}^{нов}) \geq (V_s^{CT} - V_s^{нов})$  замена общего восстановительного поезда необходимо выполнить на  $O_{ps}$ , для  $(V_{\gamma}^{CT} - V_{\gamma}^{нов}) < (V_s^{CT} - V_s^{нов})$  — на  $O_{kj}$ , при этом закрепление нового ( $l$ -го) ВП выполняется также предварительно. В рамках данного шага анало-

гичным образом выполняется замена всех имеющих общих ВП для объектов  $O_{kj}$  и  $O_{ps}$ .

Шаг 10. Если  $M_{\Pi s} = \emptyset$  (для  $s$ -й коммуникации, объекты, рассмотренные на шаге 7 закончились), то переходим к выполнению операций шага 11, при  $M_{\Pi s} \neq \emptyset$  продолжаем в рамках шага 7 обработку объектов этого множества.

Шаг 11. Если  $M_{\Pi\gamma} = \emptyset$  (для  $\gamma$ -й коммуникации, объекты, рассмотренные на шаге 6 закончились), то переходим к выполнению операций шага 12, при  $M_{\Pi\gamma} \neq \emptyset$  продолжаем в рамках шага 6 обработку объектов этого множества.

Шаг 12. При рассмотрении всех  $s$ -х ( $s \neq \gamma$ ) коммуникаций переходим к выполнению операций шага 13, иначе, в рамках шага 5 выбираем следующую коммуникацию, удовлетворяющую условию шага 5.

Шаг 13. Охарактеризуем результаты реализации алгоритма, предшествующие началу выполнения операций данного шага алгоритма.

1. ВП предварительно закреплены за объектами, которые разрушены в течение  $d_m$ -х суток ЧС.

2. Общая пропускная (провозная) способность сети железных дорог, в результате этого предварительного закрепления ВП за указанными объектами максимальна.

3. ВП, предварительно закрепленные за объектами  $M_{\Pi\gamma}$ , закреплены только за этими объектами.

В рамках данного шага:

- закрепляем (выделяем) ВП, указанные в п. 3 этого шага, за объектами (на объекты) множества  $M_{\Pi\gamma}$ ;

- исключаем эти выделенные на объекты  $M_{\Pi\gamma}$  ВП из процесса закрепления;

- в дальнейшем  $\gamma$ -ю коммуникацию на шагах 4–12 не рассматриваем.

Шаг 14. Если все коммуникации множества  $J$  просмотрены (выделение ВП проведено), алгоритм заканчивает работу (шаг 15), иначе продолжаем выполнение операций шагов 4–14.

Шаг 15. Останов.

Доказательство оптимальности предложенного метода

Для доказательства оптимальности предложенного метода распределения ВП для восстановления разрушенных в результате ЧС регионального масштаба железнодорожных объектов необходимо использовать достаточно простые рассуждения.

Действительно, в рамках каждой из итераций предложенного метода необходимо использовать нижеприведенную итерационную зависимость, корректирующую целевую функцию (1):

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} PS_j(d_{\Pi} - t_j^B) &:= \sum_{j \in J} PS_j(d_{\Pi} - t_j^B) - = \\ &= -\min\{[PS_g(d_{\Pi} - t_g^B) - PS_g(d_{\Pi} - \bar{t}_g^B)], \\ &[PS_s(d_{\Pi} - t_s^B) - PS_s(d_{\Pi} - \bar{t}_s^B)]\}. \end{aligned}$$

Сепарабельность [12] этой формулы позволяет сделать вывод — проводя в рамках каждой итерации, оптимальное распределения ВП для восстановления объектов, которые были разрушены в результате ЧС регионального масштаба, на основе принципа оптимальности Беллмана [13], получим справедливость утверждения: распределение ВП для восстановления объектов, реализуемое предложенным алгоритмом, оптимально в целом.

Как уже было сказано выше, для реализации модели распределения ресурса ВП по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, существует широкий спектр математических методов, основными среди которых для решения задач подобного типа являются методы динамического программирования и ветвей и границ [6, 9].

Однако анализ возможности применения алгоритма ветвей и границ для решения задачи распределения ресурса ВП по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, показал его неэффективность, что связано со значитель-

ной трудоемкостью алгоритма, оцениваемой как  $O(4^s)$ , где  $s$  — размерность задачи, которая определяется по формуле:

$$s = n \cdot z \sum_{j \in M} \sum_{p \in R_{r,j}} b_{jr},$$

где  $M = \{O_j : j = \overline{1, n}\}$  — множество разрушенных в рамках ряда последовательных разрушений железнодорожных объектов, на которые необходимо выделить ВП;

$n$  — число объектов множества  $M$ , число;

$z$  — число последовательных разрушений сети железных дорог региона, число;

$b_{jr}$  — фронт восстановительных работ  $r$ -го вида на  $j$ -м объекте, число.

На основании анализа, проведенного для метода динамического программирования, было установлено, что даже для указанной модели распределения ВП средней размерности ( $k = 300-400$ ) критичность метода к количеству ограничений этой модели, составляющих в среднем 6000–8000 штук, не позволяет использовать в рамках реального масштаба времени деятельности должностных лиц, руководящих восстановлением разрушенных объектов, метод динамического программирования [9].

Несомненный интерес представляет математическая постановка указанной модели, основывающаяся на классической транспортной задаче [9], трудоемкость алгоритма которой определяется как  $O(mn^2(\lg(\max_{i,j} \{a_{ri}, b_{rj}\}) + 1))$  [9], где  $m$  — количество «поставщиков» ВП,  $n$  — количество «потребителей» ВП,  $a_{ri}$  — ресурс ВП  $i$ -го поставщика  $r$ -го вида,  $b_{rj}$  — потребность в ВП  $r$ -го вида  $j$ -го «потребителя» (фронт восстановительных работ  $r$ -го вида на  $j$ -м объекте). Однако в качестве исходных данных здесь должны использоваться требуемые объемы (интенсивности) пассажирских и грузовых перевозок. Возможность получения такого вида информации для модели

ТАБЛИЦА 2. Сравнительная характеристика методов, реализующих распределение ВП по разрушенным железнодорожным объектам

Размерность задачи ( $k$ )	Продолжительность расчетов, мин.		
	Метод ветвей и границ [8]	Метод, основанный на классической транспортной задаче [9]	Предлагаемый метод
135	10	0,5	0,7
189	149	0,8	0,95
270	600	1,4	1,5
405	—	4,2	2,3
540	—	10,1	4,6
674	—	14,9	5,3

данного иерархического уровня является проблематичной.

Все указанные выше причины предопределили необходимость разработки метода моделирования распределения ресурса ВП по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, трудоемкость которого оценивается приблизительно

как  $O(n \cdot m \cdot \max_{j,r} b_{jr} + \sum_{j \in M} \sum_{p \in R_{r,kj}} b_{jr})$ , что предпо-

читительнее, чем у указанных выше методов.

Результаты моделирования восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба, представлены в табл. 2.

## Заключение

Предложен эвристический метод распределения ресурса восстановительных поездов в целях восстановления в минимально возможные сроки железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба.

Метод определяет вариант расстановки ВП на разрушенные объекты, реализующий оптимальную величину пропускной (провозной) способности сети железных дорог.

Новизна метода заключается в том, что он, в отличие от существующих методов, за счет предложенной оптимальной схемы выбора объектов,

за которыми должны закрепляться восстановительные поезда, обладает гораздо меньшей трудоемкостью, а следовательно, повышает оперативность принятия решения на восстановление разрушенных объектов.

## Библиографический список

1. Vilkov V. B. The choice of an optimal methodology for the retraining organization of psychologists based on the use of mathematical methods / V. B. Vilkov, O. I. Shcherbakova, A. K. Chernykh et al. // *Espacios*. — 2018. — Vol. 39. — № 20. — P. 16.
2. Вилков В. Б. Задачи на графах с нечетко заданными весами: монография / В. Б. Вилков, А. К. Черных, А. В. Флегонтов. — СПб.: Изд. РГПУ им А. И. Герцена, 2018. — 160 с.
3. Черных А. К. Теоретические положения моделирования распределения сил и средств внутренних войск по служебно-боевым задачам / А. К. Черных // *Междисциплинарные исследования в сфере интеграции образования и науки. сборник научных трудов научно-педагогического состава Санкт-Петербургского военного института внутренних войск МВД России*. — СПб., 2014. — С. 151–155.
4. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях / Т. Ху. — М.: Мир, 1974. — 519 с.
5. Вагнер Г. Основы исследования операций / Г. Вагнер. — М.: Мир, 1972. — Т. 1. — 335 с.
6. Вагнер Г. Основы исследования операций / Г. Вагнер. — М.: Мир, 1972. — Т. 2. — 340 с.
7. Вилков В. Б. Применение методов оптимизации при выработке решений в обучении курсантов в образо-

вательных организациях силовых структур / В. Б. Вилков, Л. В. Большакова, А. К. Черных и др. // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. — 2017. — № 2(74). — С. 165–172.

8. Нечепуренко М. И. Алгоритмы и решения задач на графах и сетях / М. И. Нечепуренко, В. К. Попков; под ред. М. И. Нечепуренко. — М.: Наука, 1990. — 513 с.

9. Михалевич В. С. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах распределения ресурсов / В. С. Михалевич, А. И. Кукса. — М.: Наука, 1983. — 207 с.

10. Ложечников Г. А. Организация восстановления железных дорог: учебник / Г. А. Ложечников, А. С. Низов, Д. И. Попов. — СПб.: ВА МТО, 2014. — 302 с.

11. Григорьев Б. М. Организация восстановления мостов на железных дорогах: учебное пособие / Б. М. Григорьев. — СПб.: ВТУ ЖДВ, 2005. — Ч. 1. — 302 с.

12. Исследование операций: в 2 т. Т. 1 / Под ред. Д. Моудера, С. Элмаграби. — М.: Мир, 1981. — 712 с.

13. Беллман Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Р. Беллман, Р. Калаба. — М.: Наука, 1969. — 120 с.

Дата поступления: 14.03.2022

Решение о публикации: 06.06.2022

#### Контактная информация:

ДЕРГАЧЕВ Алексей Иванович — канд. воен. наук, доц.; d\_ader@mail.ru

КУРАНОВА Ольга Николаевна — канд. техн. наук; olga\_kuranova@mail.ru

СТЕПАНСКАЯ Ольга Андреевна — канд. техн. наук; step\_step@mail.ru

ЧЕРНЫХ Андрей Климентьевич — д-р техн. наук, доц.; nataliachernykh@mail.ru

## Modeling the Restoration of Railway Facilities Destroyed As a Result of Emergences of a Regional Scale

A. I. Dergachev<sup>1</sup>, O. N. Kuranova<sup>1</sup>, A. K. Chernykh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky . pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

<sup>2</sup>Saint Petersburg Order of Zhukov Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, 1, Letchika Pilyutova str., St. Petersburg, 198206, Russian Federation

**For citation:** Dergachev A. I., Kuranova O. N., Chernykh A. K. Modeling the Restoration of Railway Facilities Destroyed As a Result of Emergences of a Regional Scale // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 609–617. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-609-617

### Summary

**Purpose:** To obtain analytical dependencies for the optimal allocation of resources of various type recovery trains with the purpose to restore in the shortest possible timeframes of railway facilities destroyed as a result of regional emergences. **Methods:** A heuristic method of optimal resource allocation of various type recovery trains through railway facilities, destroyed as a result of a regional emergences, is applied. Proof of the optimality of the proposed heuristic method is given. **Results:** Within the proposed method frames, new analytical dependencies are derived for the distribution of resources of recovery trains of various types through railway facilities destroyed as a result of regional emergences. Mathematical formulation, based on the formulation of non-linear model of operations research theory, as well as solution algorithm of the task for the distribution of resources of recovery trains of various types through railway facilities destroyed as a result of emergences of a regional scale are given. **Practical significance:** On the basis of the considered dependencies, it is possible to increase the efficiency of calculation operativeness allowing to embody reasonable allocation of recovery trains of various types for the restoration of railway facilities destroyed as a result of regional emergences. The results of the study can be applied to the creation of informational-predicted systems that promptly implement the proposed analytical dependencies for more efficient restoration of railway facilities destroyed as a result of emergences of a regional importance.



**Keywords:** Resources of recovery trains of various types, model for resource allocation of recovery trains of various types, algorithm for resource allocation, dynamics of recovery train arrival, technologies for performing operation on railway facilities.

## References

1. Vilkov V. B., Shcherbakova O. I., Chernykh A. K., Andreev V. P., Khudyakova T. L., Kazakova S. N. The choice of an optimal methodology for the retraining organization of psychologists based on the use of mathematical methods. *Espacios*. 2018, vol. 39, I. 20, p. 16.
2. Vilkov V. B., Chernykh A. K., Flegontov A. V. *Zadachi na grafakh s nechetko zadannymi vesami* [Problems on graphs with fuzzy weights]. St. Petersburg: RGPU im A. I. Gertsena Publ., 2018. 160 p. (In Russian)
3. Chernykh A. K. Teoreticheskie polozheniya modelirovaniya raspredeleniya sil i sredstv vnutrennikh voysk po sluzhebno-boevym zadacham [Theoretical positions of modeling the distribution of forces and means of internal troops for service and combat tasks]. *Mezhdistsiplinarnye issledovaniya v sfere integratsii obrazovaniya i nauki. sbornik nauchnykh trudov nauchno-pedagogicheskogo sostava Sankt-Peterburgskogo voennogo instituta vnutrennikh voysk MVD Rossii* [Interdisciplinary research in the field of integration of education and science. collection of scientific papers of the scientific and pedagogical staff of the St. Petersburg Military Institute of the Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. St. Petersburg, 2014, pp. 151–155. (In Russian)
4. Khu T. *Tselochislennoe programmirovaniye i potoki v setyakh* [Integer programming and flows in networks]. Moscow: Mir Publ., 1974. 519 p. (In Russian)
5. Vagner G. *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Fundamentals of operations research]. Moscow: Mir Publ., 1972, vol. 1, 335 p. (In Russian)
6. Vagner G. *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Fundamentals of operations research]. Moscow: Mir Publ., 1972, vol. 2, 340 p. (In Russian)
7. Vilkov V. B., Bol'shakova L. V., Chernykh A. K., Yakovleva N. A. Primeneniye metodov optimizatsii pri vyrabotke resheniy v obuchenii kursantov v obrazovatel'nykh organizatsiyakh silovykh struktur [Application of optimization methods in the development of solutions in the training of cadets in educational organizations of power structures]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii* [Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2017, I. 2 (74), pp. 165-172. (In Russian)
8. Nechepurenko M. I., Popkov V. K. *Algoritmy i resheniya zadach na grafakh i setyakh* [Algorithms and problem solving on graphs and networks]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 513 p. (In Russian)
9. Mikhalevich V. S., Kuksa A. I. *Metody posledovatel'noy optimizatsii v diskretnykh setevykh zadachakh raspredeleniya resursov* [Methods of sequential optimization in discrete network problems of resource allocation]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 207 p. (In Russian)
10. Lozhechnikov G. A., Nizov A. S., Popov D. I. *Organizatsiya vosstanovleniya zheleznykh dorog* [Organization of the restoration of railways]. St. Petersburg: VA MTO Publ., 2014. 302 p. (In Russian)
11. Grigor'ev B. M. *Organizatsiya vosstanovleniya mostov na zheleznykh dorogakh* [Organization of the restoration of bridges on railways]. St. Petersburg: VTU ZhDV Publ., 2005. 302 p. (In Russian)
12. *Issledovanie operatsiy* [Operations research]. Moscow: Mir Publ., 1981. 712 p. (In Russian)
13. Bellman R., Kalaba R. *Dinamicheskoe programmirovaniye i sovremennaya teoriya upravleniya* [Dynamic programming and modern control theory]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 120 p. (in Russian)

Received: March 14, 2022

Accepted: June 06, 2022

### Author's information:

Aleksey I. DERGACHEV — PhD in Military Sciences, Associate Professor; d\_ader@mail.ru

Olga N. KURANOVA — PhD in Engineering; olga\_kuranova@mail.ru

Olga A. STEPANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor; step\_step@mail.ru

Andrey K. CHERNYKH — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; nataliachernykh@mail.ru