



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Tunnel Engineering—Article

岛上特大城市——隧道系统作为解决交通问题的关键备选方案

Vladimir V. Makarov

Far Eastern Federal University, Vladivostok 690090, Russia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 April 2017

Revised 7 September 2017

Accepted 22 September 2017

Available online 3 February 2018

关键词

特大城市
交通
隧道
效率
标准

摘要

岛上大都市建设的一大关键困难是由有限的岛面用地导致的交通问题——公路及停车场地均需布置在已开发完成的岛上。这一限制便造成了公路数量稀少、路面交通拥堵、停车场地有限、车辆停放不规范等现象，容易引起安全事故。符拉迪沃斯托克市位于俄罗斯远东地区穆拉维约夫-阿穆尔半岛（滨海边疆区）。该市因处在地缘政治要地，所以实际上也是俄罗斯的第三大首府。目前，为解决市内车辆交通问题，同时又考虑到缺少新建公路所需用地，当局就此提议应充分利用海岸沿线的海滩及滨水区域。不过，此项决定却与符拉迪沃斯托克市争创世界一流城市的生态及社会愿景存在明显冲突，且未能吸取世界其他海滨城市的经验教训——最初均在地面上修建了滨海公路，但之后又决定斥巨资拆除公路以合理享用滨海区的环境和历史资产。因此，建设一个独立的隧道交通系统及附加的地下停车场，似可作为解决交通问题的另一关键方案。此种方案的优点在于，它既能有效解决交通问题，又能改善该市的生态环境和宜居性。从解决交通问题的实际出发，在对两种方案进行比较后（即“地下”与“地面”的比较），可以看到独立的隧道系统具有多项主要优势。在比较中，我们提出了一套综合的效率评测标准，用以对符拉迪沃斯托克市交通系统方案的变量进行量化评估。经评估，地下方案比地面方案效率高出近 1.8 倍。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

就居民每千人的汽车拥有量而言，符拉迪沃斯托克市在俄罗斯各大城市中位列榜首，根据不同的估算结果，其每千人的汽车拥有量为 520 ~ 560 辆[1]。不过，该市既有公路的承载能力有限，需新建道路网络。另外一个问题是缺乏机动车停车位，造成既有公路上的乱停车现象，进一步恶化了交通问题。

近年来，为了筹办亚太经济合作组织（APEC）峰会，做出了大量改善交通的努力：改建了从市中心至符

拉迪沃斯托克国际机场的基本路线，新建了两座大型拉索桥。这些建设减少了 Svetlanskaya 中心街道上的车流量，并缓解了卢格瓦广场周围的交通堵塞状况——这两个地方是该市公路网中问题最大的区段。然而，做出的改善仅缓解了部分既有问题。

该市的交通网络具有道路狭窄，无法提供必要承载能力的特征，该市的山地地形及其周围的海湾使交通问题变得更加复杂。在地面城市建筑如此密集的条件下，新建道路几乎难以实现。目前，正开始出现一些利用海湾滨水区的项目，这大大削弱了这座城市在基础设施方

* Corresponding author.

E-mail address: vlmvv@mail.ru

面的吸引力，使人民失去了休闲娱乐空间。基于上述因素，需要新建由公路隧道系统与地下停车场组成的地下交通路网（图1）。

2. 交通系统效率标准

为了评价公认设计在处置作为城市基础设施组成部分的设施方面的可行性，不仅需要考虑到涉及的费用，而且需要考虑解决方案在特大城市其他优先事项（如生态文明、健康、安全、生活舒适度、基础设施吸引力等）方面的效率[2,3]。

为了估算隧道建设的生态效率，需要对符拉迪沃斯托克城市道路上机动车排放的有害物质进行定量分析，并分析城市道路上机动车产生的噪声水平。



图1. 符拉迪沃斯托克市公路隧道系统径向环路项目。1.隧道；2.地下停车场。

2.1. 生态安全标准

对于国家管理机构而言，在思考经济活动时，产品、工程和服务方面的国家安全标准须全面考虑一个地区的生活和健康状况[4,5]。我们站在这个立场上来观察符拉迪沃斯托克的环境状况。

2.1.1. 有害大气排放物数量估算

汽车运输是污染该市大气的主要有害排放物来源。据气象部门报道，符拉迪沃斯托克汽车运输排放的有害物质扩散的特定参数加剧了该市的环境恶化[6]。目前，该市主城区的大气污染问题已达到严重水平。

2011年汽车运输的排放量为 2.015×10^5 t（占该地区排放总量的47.25%）[7]。交通信号灯地带和居民区的尾气浓度特别高。高峰时段的十字路口等地方会形成交通拥堵，汽车消耗氧气，大气中充斥着汽车尾气。符拉迪沃斯托克市的高峰期发生在早上（这时成人离开家去上班并将小孩送到学校或托儿所）和傍晚（返家）。

符拉迪沃斯托克市政府2010年记录的空气污染监测数据如表1所示[8]。年中二氧化氮和粉尘的浓度比最大浓度限值高1.5~2倍。

根据相关研究，符拉迪沃斯托克市的大气限域受到二氧化氮的严重污染，二氧化氮对眼睛和肺的黏膜具有刺激和腐蚀作用。二氧化氮可使支气管炎和哮喘等既有呼吸系统疾病快速恶化，使呼吸道感染更容易、更快地扩散。二氧化氮可视为对人群的一种严重健康危害[9]。为举办APEC峰会而新建道路后，这一情况急剧恶化（表2）。

地下有害排放物与地上有害排放物的一个显著区别是：地下有害排放物是“可以调节的”。换言之，地上汽车排放的易挥发尾气分布范围广，无法将其“捕获”。而隧道里的气体分布受隧道壁的限制，可将其捕获，因

表1 2010年滨海边疆区居民区汽车交通产生的一般污染排放物

Types of transport facilities	Fuel types	Quantity of vehicles	Contaminants (tons)
Cars	Gasoline	479 888	61 562
Trucks and buses with a full weight less than 3 500 kg	Gasoline	38 133	31 413
	Diesel	10 895	1 381
Trucks greater than 3 500 kg	Gasoline	25 273	54 653
	Diesel	56 864	18 477
Buses with a full weight greater than 3 500 kg	Gasoline	1 484	7 723
	Diesel	2 444	1 576
Total		614 981	176 785

1 ton = 907.18474 kg.

表2 2013年滨海边疆区居民区汽车交通产生的一般污染排放物。

Types of transport facilities	Fuel types	Quantity of vehicles	Contaminants (tons)
Cars	Gasoline	736 811	94 522
Trucks and buses in full weight less than 3 500 kg	Gasoline	29 147	24 011
	Diesel fuel	8 097	1 027
Trucks greater than 3 500 kg	Gasoline	17 618	38 100
	Diesel fuel	39 641	12 880
Buses in full weight greater than 3 500 kg	Gasoline	1 982	10 316
	Diesel fuel	3 264	2 106
Total		836 560	182 962

为强制空气循环对于地下构筑物正常运行是必需的。输送到地面后，回风流经通风机和空气洗涤器，对空气进行清洁处理，对有害气体进行中和处理，从而减少了有害排放物的数量。

公路隧道系统的另一个优势是使用公路隧道系统将大大减少花在机动车内的时间，缓解交通拥堵问题，提高燃料经济性。据初步估算，公路隧道网络建成后，大气中有害污染物的数量将减少至原来的1/10 ~ 1/8。

如果要测量公路隧道系统建成前和建成后达到最高空气污染浓度水平的程度，可采用10分制来理解隧道系统的有效性。这种情况下，10分表示完全达到最高水平，1分表示完全未达到该水平。因此，对于项目而言，“建成前”的分数为1分，“建成后”的分数为7分。

2.1.2. 汽车运输噪声水平的估算

噪声指对人们要听的声音产生干扰，打破寂静，引起人烦躁或音量过强而危害人体健康或妨碍人体正常工作的令人不愉快的声音或系列声音[10]。与噪声不同，声音指听觉器官与声波相互作用而感知到振动的生理现象。因此，我们将声音视为生理现象，将噪声视为生态参数。根据符拉迪沃斯托克市政府的数据，基础平交道口和立交桥构筑物处的噪声水平接近70 dB，大大高于55 dB(A)的定额。最大噪声水平出现在一天中的不同时段：8:30-9:30；13:30-14:30；16:30-17:30。

符拉迪沃斯托克建筑规划未考虑交通噪声。城市噪声治理应包含合理布置建筑物、合理设计道路、合理使用汽车消声器以及设置绿化植物。试图通过隔离来治理街道上的噪声只能作为权宜之计。噪声治理需要标本兼治。公路隧道网络（环向和径向隧道系统）建成后，大部分一般汽车交通将使用地下道路，城市噪声水平将随之降低。

据初步估算，公路隧道网络建成后，基础平交道口和立交桥构筑物处的噪声水平将变成50 dB(A)。如果要

基于上述10分制（其中10分表示完全达到最高水平，1分表示完全达不到该水平）测量公路隧道系统建成前和建成后达到最高理想噪声水平的程度，则“建成前”的分数为1分，“建成后”的分数为7分。

还需要考虑噪声治理不仅为人们的工作和生活创造舒适环境，而且可带来显著的间接经济效益，因为噪声是降低人们工作能力的、无用的消散能量。

2.2. 交通安全

根据俄罗斯法律的规定，交通安全指反映保护汽车交通参与者免受道路和交通事件及其后果影响程度的给定程序条件。道路和交通事件（即道路事故）指发生在道路交通过程中涉及交通设施，导致人员死亡或受伤，导致交通设施、结构或货物受损或其他材料受损的事件。道路和交通事件不包括仅涉及行人的事故（如在道路上绊倒、被人群撞倒等）[10]。

隧道内的交通安全通常优于敞开式路段的交通安全（隧道内道路事故数量少50%左右；然而，隧道内道路事故的后果更加严重）。同时，隧道不仅能够缩短被高山分隔的各地区和城市间的距离，而且还能够在极端天气条件下向各地区和城市运送重要货物。符拉迪沃斯托克的极端天气条件十分显著：夏季有台风，冬季有强降雪和暴风雪。

为提高隧道安全性，通常应采取主动措施以防止撞车事故发生，并结合被动措施以减轻事故后果。目前，俄罗斯国内和国外的隧道建设经验均表明，隧道内的交通安全性比地上道路的交通安全性更高。安全性的提高是通过以下方式实现的：利用现代硬件设施管制交通，运用通风和泵送装置，提高消防安全性，监测空气中的有害杂质，控制电力供应，控制照明以及其他功能。

如果基于相同的10分制（其中10分表示完全达到交通安全水平，1分表示完全达不到该水平）对符拉迪沃斯托克市建设环向和径向公路隧道系统网前后的交通安

全水平进行测量,则“建成前”的分数为1分,“建成后”的分数为8分。

2.3. 项目的基础设施吸引力

对于需要对整座城市或其各区域交通系统做出根本变更的项目而言,基础设施吸引力这个参数特别重要。这种情况下,对主要客运量的时间和不同人群花在交通上的时间进行估算。根据公认的估算结果,目前花在市区内交通上的时间大约为20 min,使出行变得困难[11]。此外,就基础设施吸引力而言,一座城市的交通系统稳定性是所有特大城市的关键问题。对于符拉迪沃斯托克,最严重的问题是冬季和夏季的天气条件,冬季有暴风雪,夏季有台风。

对符拉迪沃斯托克市环向和径向公路隧道系统施工设计的基础设施吸引力进行估算可得,“建成前”的分数为1分,“建成后”的分数为10分。

2.4. 项目经济技术分析

根据建设决策和备选方案分析开展技术经济分析。该市交通问题的一般有效解决方案如图1所示,图1显示了拟建地下径向-环向公路隧道系统以及在该市中部拟建的一系列地下停车设施。

经过对这些建设方案的费用进行比较可知,这些方案的费用均为600亿~1200亿卢布(10亿~20亿美元)。该费用水平与挪威(即霍达兰郡)和瑞士(即苏黎世)同类项目的费用相当。根据采用的工程技术,工期也有所不同。然而,采用盾构法施工的话,本项目需要8~10年即可建成。这些估算表明,解决符拉迪沃斯托克交通问题的推荐方案在技术上和经济上均是可行的。

3. 复杂的建设效率估算

估算隧道建设的效率是一项复杂的任务,完成该任务采用以下方法:比较目前道路养护关键参数与隧道网络建成后道路养护参数,用分数形式表示经济、社会、生态效果。此外,多参数优化设计过程需对各种设计方案进行比较;此处仅进行技术经济分析还远远不够。

对“建成前后”的交通状况进行分析可知,“生态”部分的效率根据两个因素(空气污染和噪声污染水平)进行评判。“建成后”,基础平交道口和立交桥构筑物处

的分数为7分,而“建成前”的分数为1分。该效率的提升得益于使用隧道系统时车辆交通节省了大量时间,亦即车辆仅需在隧道里行驶5 min,而不用在地面道路上的交通拥堵中耗费1 h。

“建成后”“安全”部分的分数为8分,“建成前”的分数为1分;建成后,“项目基础设施吸引力”部分的分数为10分,建成前的分数为1分。对这些分数汇总可得,“建成后”的分数为25分,而“建成前”的分数为3分。

地下建设效率估算的复杂标准 K_{CE} 可按下式计算:

$$K_{CE} = \sum_{i=1}^N q_i K_i / N \quad (1)$$

式中, K_i 为*i*参数各个方面的估算值; q_i 为第*i*个参数的相对“权重”; N 为参数数量。

在符拉迪沃斯托克条件和被考虑参数相等“权重”条件下,可得 $K_{CE} = 8.3$ 。该参数值很高,印证了拟建项目的效率。

与地面交通系统项目(图2)相比,地下隧道系统具有更加重要的优势,如表3和表4所示。表4所示的定量分析表明,隧道系统比地面交通系统项目的优势平均高1.8倍。

符拉迪沃斯托克交通系统中融入地下环路设计与地面交通相比,在交通流速度、通行时间、生态兼容性和安全性等方面的得分更高;因此,本项目将提高俄罗斯远东地区首府在商业和居住方面的基础设施吸引力。

4. 项目建设的其他潜在影响

对城市地下空间开发的研究采用的参数包括地下建设部分的面积与城市总面积的关系(用百分比表示)。城市条件下,该比例为4%~87.5%[12]。加强地下空间的利用还能够使市民的生活更加舒适。为了充分利用公路隧道项目的优势,需要研究用明挖法等建设附属地下结构的可行性。“如果是这样的话,高达70%的停车场和车库、80%的仓库、50%的档案室和储藏室、高达30%的工厂可建在地下。”[13]

可在环向和径向公路隧道系统网络基础上建设分布式以工业和服务业为导向的地下综合体。然而,要实施此类地下建设方案,需要对创建此类新的城市领地、工业区和服务区以及对山区地质和大都市环境条件的影响开展额外深入的社会、经济、生态评估。

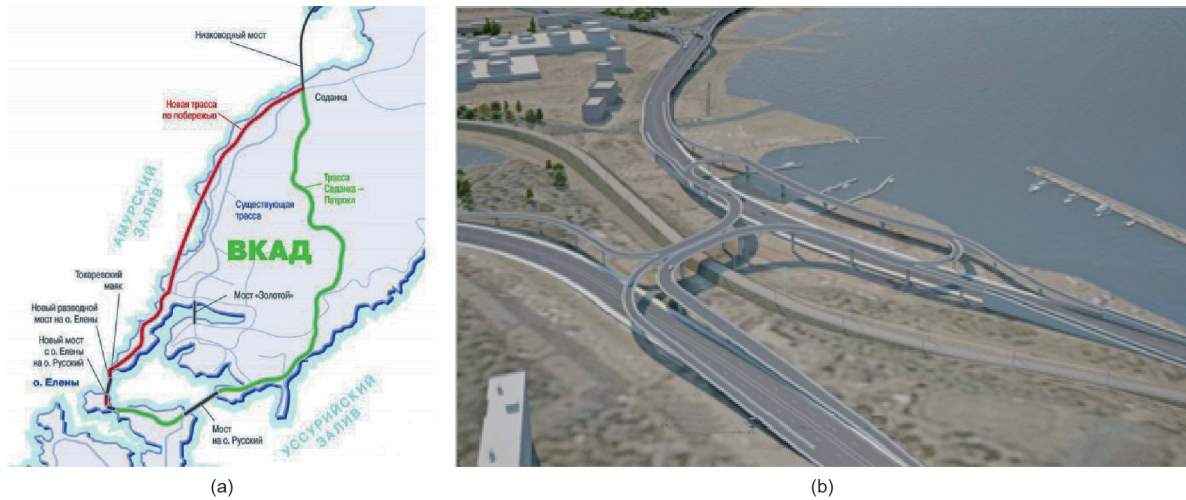


图2. 符拉迪沃斯托克环形道路（VCR）项目。（a）基本方案；（b）三维项目。

表3 环形道路项目与隧道项目的对比（质量）

Factor	VCR	Tunneling	Comparison
Cost (billion RUB)	55	60	Comparable
Time construction (years)	5	8	Comparable
Traffic jams	Incomplete decision	Complete decision	Tunneling +
Ecology: air quality	Incomplete decision	Complete decision	Tunneling +
Ecology: noise	Incomplete decision	Complete decision	Tunneling +
Car parking	No	Full decision	Tunneling +
City infrastructural attractiveness	Sharp fall	Sharp rise	Tunneling +
Project investment attractiveness	Average	High	Tunneling +

表4 环形道路项目与隧道项目的对比（基于10分制）

Factor	VCR	Tunneling	Comparison
Cost	6	5	Comparable
Time construction	7	5	Comparable
Traffic jams	5	8	Tunneling +
Ecology: air quality	5	9	Tunneling +
Ecology: noise	6	9	Tunneling +
Car parking	0	10	Tunneling +
City infrastructural attractiveness	1	9	Tunneling +
Project investment attractiveness	5	9	Tunneling +
Average	4.4	8.3	

5. 结论

符拉迪沃斯托克市的建筑空间十分短缺；为克服这一问题，需效仿挪威、日本和中国等国，充分开发和利用地下空间。专家们认为在符拉迪沃斯托克市建设地下交通枢纽是可行的。符拉迪沃斯托克这样的城市四周被山地环绕，交通十分困难。然而，可穿越山体开挖隧道，

并融入一座城市必需的停车等基础设施。

在符拉迪沃斯托克市建设公路隧道网络将通过以下方式解决大量问题：

- （1）合理利用陆地；
- （2）有效组织客运服务，提高交通安全性；
- （3）降低街道噪声，减少汽车尾气引起的空气污染；
- （4）提升该市的基础设施吸引力。

Acknowledgements

The author is grateful to Professor Raymond L. Sterling for constructive discussions and wide-ranging support in all the stages of the paper writing. This study is supported by the grant of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (5.2535.2014K).

Reference

- [1] Primorsky Krai Administration. Analytical review of the ecological status of Primorsky Krai in 2013 [Internet]. Vladivostok: Primorsky Krai Administration; c2017 [cited 2017 Oct 19]. Available from: <http://www.primorsky.ru/>. Russian.
- [2] Babushkina NP, Cherepanova MV. The impact of environmental factors on the development of the child's organism. Vladivostok: VGUES Publishing; 2006. p. 192. Russian.
- [3] Peden M, Scurfield R, Sleet D, Mohan D, Hyder AA, Jarawan E, et al., editors. World report on road traffic injury prevention. Report. Geneva: World Health Organization; 2004. Russian.
- [4] Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. State report "Russian Federation on the state and protection of the environment in 2011" [Internet]. Moscow: Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation; [cited 2017 Oct 19]. Available from: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/list.php?part=1101>. Russian.
- [5] The Law of the Russian Federation of N 5154-I "On Standardization" (Jun 10, 1993). Russian.
- [6] Karagodina LI. City and noise. *Priroda* 1993;6:10–5. Russian.
- [7] The usage of underground space: It is time to go beyond the usual. Saint Petersburg: Bulletin of the Building Complex; c2003–2017 [updated 2012 Jun 26; cited 2017 Oct 19]. Available from: <http://www.vestnik.info/archive/46/article1040.html>. Russian.
- [8] Gibdd.ru [Internet]. Primorye Territory: The Traffic Police Ministry of Internal Affairs of Russia; c2012–2017 [cited 2017 Oct 19]. Available from: <http://www.gibdd.ru>. Russian.
- [9] The state system of sanitary and epidemiological regulation of the Russian Federation of CN 2.2.4/2.1.8.562-96 "Noise in the workplace, in residential and public buildings and in residential areas" (Oct 31, 1996). Russian.
- [10] Silianov VV. Priority of scientific and practical works in the field of traffic safety. *Sci Tech Road Branch* 2011;2:1–2. Russian.
- [11] The Federal Law of 196-FZ "On Road Traffic Safety" (Dec 10, 1995; amended on Dec 1, 2007). Russian.
- [12] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Fatality analysis reporting system (FARS) encyclopedia. Washington, DC: NHTSA; [cited 2017 Oct 19]. Available from: <https://www-fars.nhtsa.dot.gov/Main/index.aspx>.
- [13] Voylokov I. Development of cities leaves underground. Saint Petersburg: Bulletin of the Building Complex; c2003–2017 [updated 2013 Nov 24; cited 2017 Oct 19]. Available from: <http://www.vestnik.info/archive/89/article1355.html>. Russian.