



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65

УДК 528.063

Научная статья

## Развитие методов уравнивания нивелирных сетей

Е.Н. Есина

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,  
Российская Федерация, 111020, Москва, Крюковский тупик, 4  
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В.В. Лиходеевская

ООО «СМУ-6 Метростроя», Российская Федерация, 127473, Москва, ул. Селезневская, д. 29, стр. 2

### История статьи:

Поступила в редакцию: 11 апреля 2020 г.

Доработана: 16 мая 2020 г.

Принята к публикации: 18 мая 2020 г.

### Ключевые слова:

геомеханический мониторинг, нивелирные сети, уравнивание, параметрический метод уравнивания, метод узлов профессора В.В. Попова

Статья посвящена сравнению методик расчета приближенных отметок узловых пунктов при уравнивании нивелирных сетей строгими и нестрогими методами. В ходе интенсивного освоения подземного пространства мегаполисов, строительства уникальных объектов и сооружений актуальным является обеспечение геомеханического мониторинга за взаимным влиянием возводимых и эксплуатируемых объектов. При выполнении работ по мониторингу деформационных процессов возникает задача оценки устойчивости опорных реперов в случае их попадания в зону влияния других объектов. В ходе исследования были разработаны математические модели нивелирных сетей, представленных в виде замкнутого хода и набора разомкнутых полигонов. Анализ моделирования позволяет определить возможность применения метода узлов профессора В.В. Попова вместо параметрического метода уравнивания. Установлено, что качество результатов уравнивания строгим методом полностью зависит от качества измерений, поскольку отклонения от истинных значений не превышают ошибку измерения. Выполненные исследования показали, что можно добиться упрощения обработки данных мониторинга и оценки различных вариантов конфигурации нивелирных сетей, используя алгоритмы расчета приближенных отметок узловых пунктов. Это позволяет упростить обработку результатов мониторинга и оценку различных вариантов конфигурации сетей при обеспечении требуемого уровня точности измерений.

### Введение

В современных условиях больших мегаполисов при активной застройке целых микрорайонов,

активном освоении подземного пространства этих территорий, строительстве уникальных объектов и сооружений остро встает вопрос геомеханического мониторинга за взаимным влиянием возводимых и эксплуатируемых объектов [1–5]. В центре мегаполисов подземное пространство используется максимально активно. Этому способствуют дефицит земли, жесткие ограничения по высоте здания, габаритам участка, архитектурному стилю. В то же время подземные объекты являются объектами повышенной опасности как в процессе строительства, так и при эксплуатации. Осо-

Есина Екатерина Николаевна, старший научный сотрудник ИПКОН РАН, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, доцент, кандидат технических наук, Web of Science ResearcherID: E-6092-2017, eLIBRARY SPIN-код: 9090-9868, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1685-2406>, [esina-en@rudn.ru](mailto:esina-en@rudn.ru)

Лиходеевская Владислава Васильевна, сменный маркшейдер ООО «СМУ-6 Метростроя».

© Есина Е.Н., Лиходеевская В.В., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



бенно в условиях плотной жилой застройки города и его подземной части. Эффективность и безопасность освоения подземного пространства крупных городов определяется достоверностью оценки исходного геомеханического состояния массива горных пород, качеством выполненного прогноза его изменения в результате техногенного воздействия и подземного строительства, а также оперативностью и соответствием требованиям мониторинга за развитием деформационных процессов [5]. Контроль за геомеханическими процессами, происходящими в массиве горных пород, на земной поверхности и в сооружениях, является наиболее ответственным этапом работ. Под геомеханическим мониторингом понимается «система инструментальных наблюдений, обеспечивающая своевременное обнаружение признаков, предшествующих возникновению аварийных ситуаций с таким расчетом, чтобы вовремя можно было принять необходимые профилактические и защитные мероприятия» [6–8]. При выполнении работ по мониторингу деформационных процессов возникает задача оценки влияния устойчивости опорных реперов, потому что в описанной выше ситуации может наблюдаться явление попадания опорного репера в зону влияния другого объекта, как строящегося, так и эксплуатируемого [9–11]. Большинство методик по оценке устойчивости опорных реперов базируются на использовании результатов уравнивания и оценки точности по результатам уравнивания. В современных условиях существует две группы методов уравнивательных вычислений: строгие, полностью реализующие главное условие метода наи-

меньших квадратов, и нестрогие, в которых это условие либо выполняется частично, либо вообще не выполняется [12–15]. Из строгих в настоящее время самое большое распространение получил параметрический метод уравнивания. Из нестрогих наиболее всего под решения задач анализа деформационной составляющей геомеханического мониторинга подходит метод узлов профессора В.В. Попова [16–19]. Актуальной является задача обоснования условий применения строгих и нестрогих методов уравнивания на основе оценки точности получаемых результатов.

### Результаты и обсуждение

Исследование выполнено в несколько этапов. Были рассмотрены стандартные схемы нивелирных сетей, применяемых при геомониторинге. На первом этапе рассматривались сети, представленные группой замкнутых нивелирных ходов с узловыми точками, встречающиеся преимущественно при строительстве зданий и сооружений. На втором этапе выполнялись исследования по разомкнутым полигонам, применяемым в качестве профильных линий на месторождениях полезных ископаемых.

Схемы исходных сетей представлены на рис. 1, 2. Для создания математических моделей были сгенерированы отметки всех узловых и исходных реперов и длины звеньев сети. По заданным отметкам рассчитывались превышения по каждому звену сети, то есть разработаны идеальные модели по каждому полигону (без ошибок) (см. таблицу).

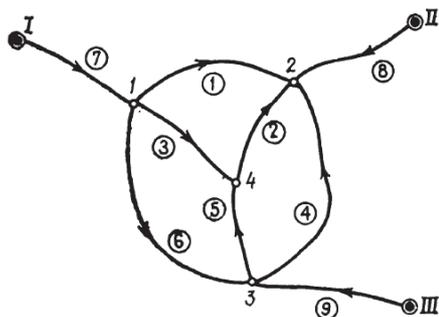


Рис. 1. Схема замкнутого нивелирного хода  
[Figure 1. Scheme of a closed leveling stroke]

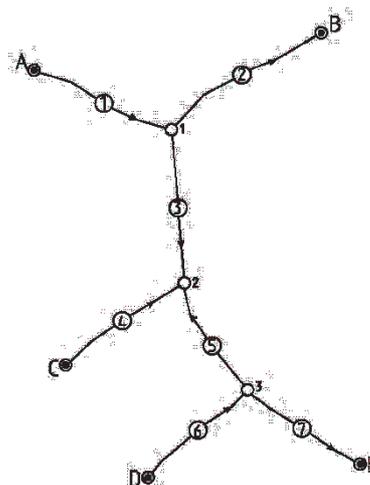


Рис. 2. Схема разомкнутого полигона  
[Figure 2. Diagram of an open polygon]

**Исходные данные для создания модели**  
 [Table. Source data for creating the model]

Замкнутый нивелирный ход [Closed leveling stroke]			Разомкнутые полигоны [Open polygons]		
Номер хода [Number of stroke]	Длина, км [Length, km]	Превышение, м [Exceeding, m]	Номер хода [Number of stroke]	Длина, км [Length, km]	Превышение, м [Exceeding, m]
1	17,2	11,149	1	9,7	3,238
2	6,4	4,207	2	8,0	1,753
3	12,1	6,977	3	20,2	0,844
4	3,8	5,101	4	13,6	7,753
5	7,7	0,930	5	10,6	2,247
6	4,5	6,084	6	10,0	1,410
7	9,8	3,369	7	12,9	8,898
8	5,5	7,750			
9	10,3	5,467			
Реперы [Points]	Отметка, м [Height, m]		Реперы [Points]	Отметка, м [Height, m]	
I	184,552		A	176,389	
II	191,284		B	181,308	
III	188,502		C	172,682	
			D	176,814	
			E	187,050	

Математические модели позволяют оценить влияние величин ошибок измерений на результаты уравнивания. В данных моделях веса звеньев остаются постоянными, а значения превышений и высотных отметок изменяются путем введения случайных ошибок из трех различных диапазонов: от  $-4$  до  $+4$  мм; от  $-12$  до  $+12$  мм; от  $-36$  до  $+36$  мм.

Распределение генерируемых ошибок подчиняется нормальному закону. Приняты следующие алгоритмы расчета приближенных координат узловых пунктов:

- по кратчайшему пути;
- по среднему значению;
- по средневзвешенному значению;
- по усредненному значению от всех исходных пунктов по короткому пути (для замкнутого полигона).

Для выполнения численных экспериментов составлены табличные формы для уравнивания выбранных сетей параметрическим методом и методом узлов профессора В.В. Попова в программе Excel. Реализации алгоритмов уравнивания представляют собой табличные формы с забитыми формулами для производства вычислений. Табличные формы состояли из трех основных групп: 1-я группа – форма исходных данных, 2-я группа – основные вычисления и 3-я группа – вывод результатов. Вычисления по методу профессора В.В. Попова выполнялись в следующей последовательности: определялись невязки по звеньям, их веса, невязки и веса узлов; составлялась матрица для расчета поправок к приближенным

значениям искомых величин. На заключительном этапе производилось вычисление уравненных значений высотных отметок узловых пунктов.

Реализация параметрического метода уравнивания была выполнена по аналогичной схеме.

Проверка корректности составленных моделей осуществлялась путем занесения в нее сгенерированных исходных данных. Программы показали нулевые невязки и нулевые поправки, то есть корректно обрабатывали модель.

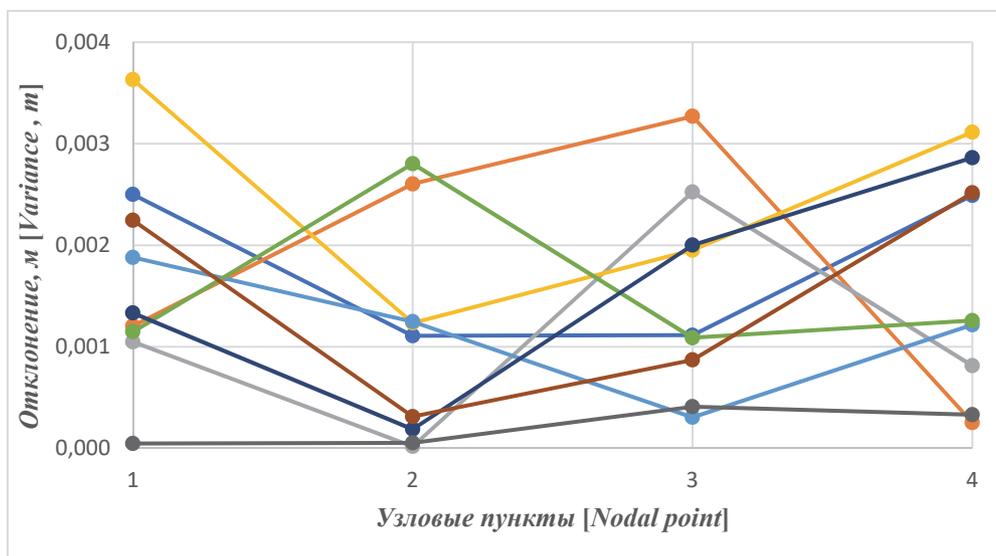
В заданных диапазонах были сгенерированы по десять вариантов нивелировок. Для всех вариантов рассчитывались приближенные координаты по каждому указанному алгоритму каждым методом. По полученным значениям производилось уравнивание.

Так как известны истинные значения координат узловых пунктов, можно определить величины отклонений полученных значений от безошибочной модели.

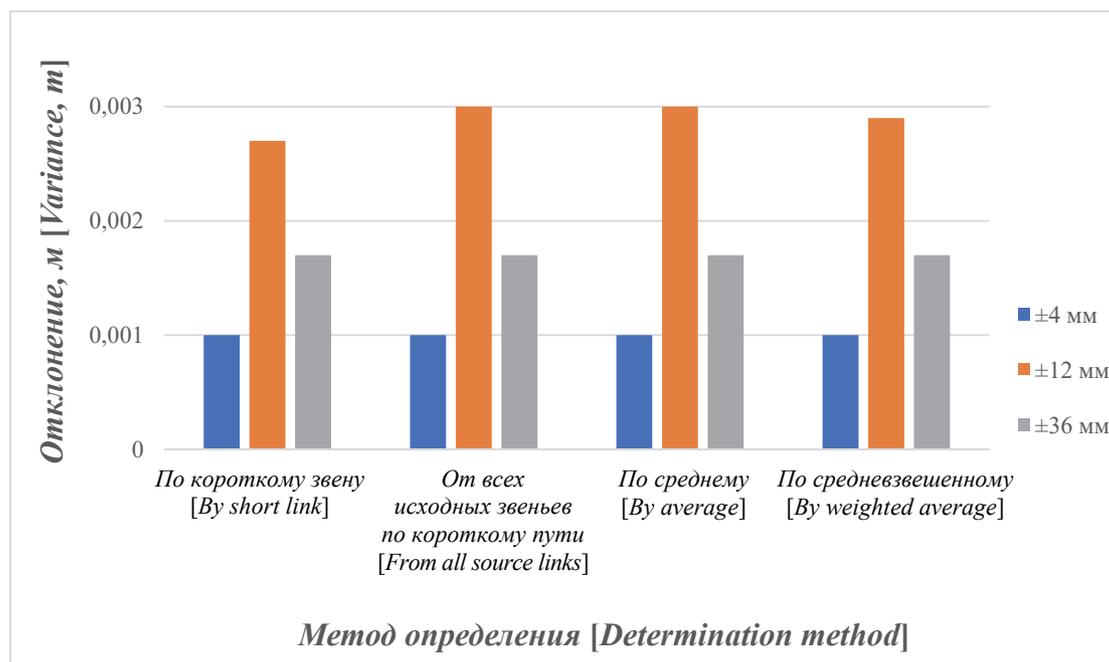
Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что качество результатов уравнивания строгим методом полностью зависит от качества измерений, поскольку отклонения от истинных значений не превышают ошибку измерения (рис. 3).

В отличие от нестрогого метода на результат уравнивания строгим методом способ расчета приближенных отметок узлов не влияет (рис. 4 и 5).

При этом, очевидно, что самый оптимальный алгоритм расчета приближенной отметки нестрогим методом для полигонов и разомкнутых сетей – по средним значениям (рис. 5).



**Рис. 3.** Модули отклонений уравненных координат узловых пунктов от истинных значений для диапазона ошибок  $\pm 4$  мм, рассчитанных строгим методом  
**[Figure 3.** Modules of deviations of the equalized coordinates of nodal points from the true values for the error range  $\pm 4$  mm, calculated by the strict method]



**Рис. 4.** Распределение модулей средних погрешностей строгого уравнивания в зависимости от метода определения приближенных отметок узловых пунктов  
**[Figure 4.** Distribution of modules of average errors of strict equalization depending on the method of determining approximate marks of nodal points]

В случае, когда конфигурация сетей представляет собой набор разомкнутых ходов с узловыми пунктами, алгоритмы расчета по среднему и средневзвешенному значению сопоставимы (рис. 6).

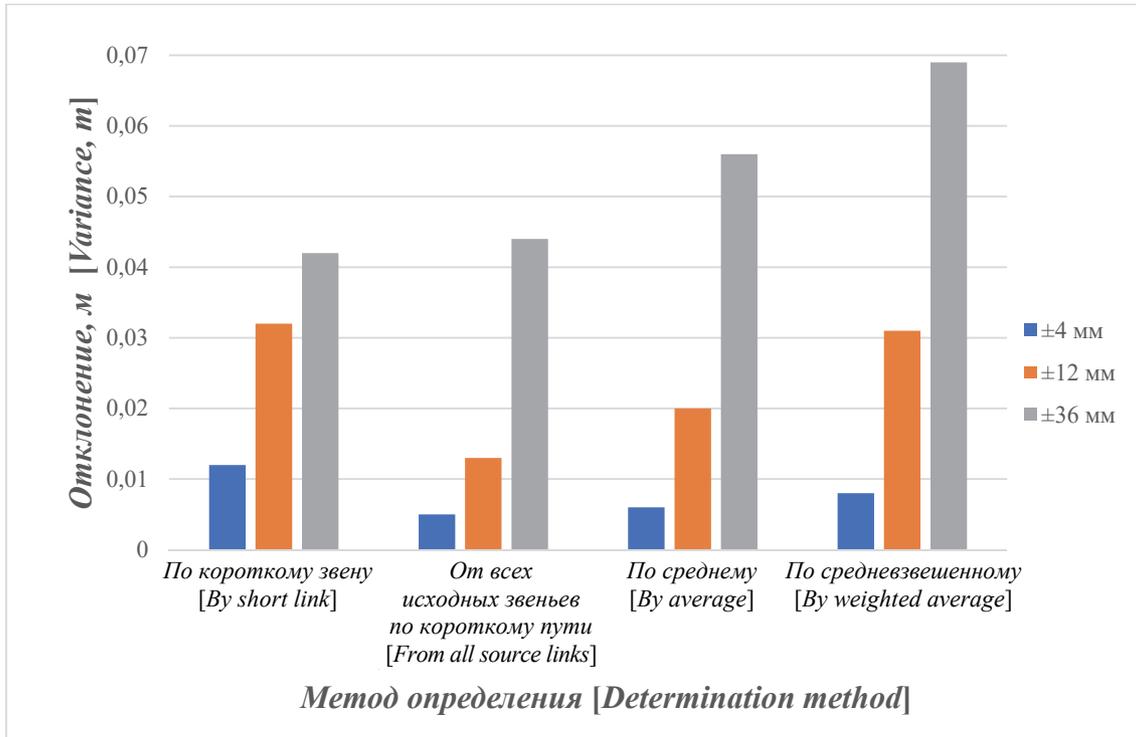
Отклонения от истинных значений, полученных при расчете нестрогим методом, не превы-

шают двойной ошибки, закладываемой в расчет (рис. 4 и 5). Результаты уравнивания строгим и нестрогим методами зависят от качества измерений.

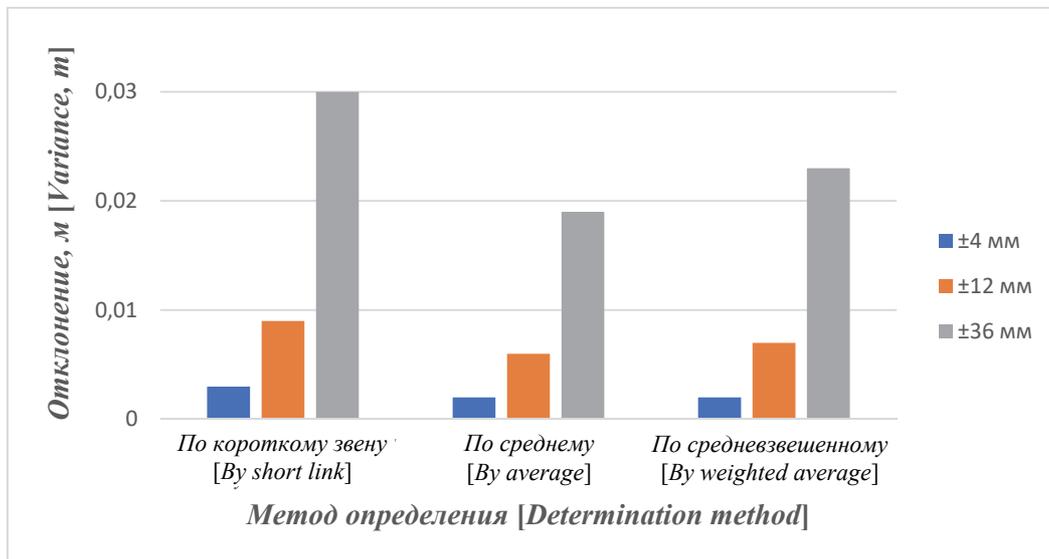
Используя следующие алгоритмы расчета приближенных отметок узловых пунктов для метода узлов профессора В.В. Попова, можно получить

результаты, аналогичные результатам, полученным строгими методами: для разомкнутых полигонов – по среднему значению, для замкнутых сетей – по усредненному значению от всех исходных

пунктов по короткому пути. Это позволяет упростить обработку данных мониторинга и оценку различных вариантов конфигурации сетей, используемых для мониторинга.



**Рис. 5.** Распределение модулей средних погрешностей нестрогого уравнивания замкнутых полигонов в зависимости от метода определения приближенных отметок узловых пунктов  
**[Figure 5.** distribution of modules of average errors of non-strict equalization of closed polygons depending on the method of determining approximate marks of nodal points]



**Рис. 6.** Распределение модулей средних погрешностей нестрогого уравнивания разомкнутых полигонов в зависимости от метода определения приближенных отметок узловых пунктов  
**[Figure 6.** Distribution of modules of average errors of non-strict equalization of open polygons depending on the method of determining approximate marks of nodal points]

## Заключение

Выполненное обоснование способа расчета приближенных отметок узловых пунктов при уравнивании нивелирных сетей разными методами доказывает, что качество результатов уравнивания строгим методом полностью зависит от качества измерений, и в отличие от нестрогим метода на результат уравнивания строгим методом способ расчета приближенных отметок узлов не влияет. Определено, что оптимальным алгоритмом расчета приближенной отметки нестрогим методом для полигонов и разомкнутых сетей является расчет по средним значениям, а в случае, когда конфигурация сетей представляет собой набор разомкнутых ходов с узловыми пунктами, алгоритмы расчета по среднему и средне-взвешенному значению сопоставимы. Установлено, что отклонения от истинных значений, полученных при расчете нестрогим методом, не превышают двойной ошибки, закладываемой в расчет. Выполненные исследования показывают, что можно добиться упрощения обработки данных мониторинга и оценки различных вариантов конфигурации сетей, применяемых при мониторинге, используя алгоритмы расчета приближенных отметок узловых пунктов: для разомкнутых полигонов – по среднему значению, для замкнутых сетей – по усредненному значению от всех исходных пунктов по короткому пути. Это дает возможность упростить обработку результатов мониторинга и оценку различных вариантов конфигурации сетей при обеспечении требуемого уровня точности измерений.

## Список литературы

1. Картозия Б.А. Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1. С. 615–630.
2. Broere W. Urban problems – Underground solutions // Advances in Underground Space Development: Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference of ACUUS. 2013. Pp. 1528–1539. doi: 10.3850/978-981-07-3757-3RP-087-P012.
3. Макишин В.Н., Николайчук Д.Н. Принципы формирования подземных транспортных систем мегаполисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S62. С. 39–43
4. Глозман О.С. Подземное планирование Москвы // Жилищное строительство. 2016. № 11. С. 14–19.

5. Трубецкой К.Н., Иофис М.А. Состояние и проблемы освоения подземного пространства города Москвы // Маркшейдерский вестник. 2007. № 4 (62). С. 27–30.

6. Иофис М.А., Негурица Д.Л. Мониторинг состояния сооружений при деформировании их основания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. № 10. С. 138–143.

7. Kaliampakos D. Underground development: a springboard to make city life better in the 21<sup>st</sup> century // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 205–213.

8. Иофис М.А. Проблемы комплексного освоения территорий и подземного пространства крупных городов и пути их решения // Маркшейдерский вестник. 2006. № 4 (58). С. 20.

9. Колесникова Л.А. Экологические риски при создании объектов городской инфраструктуры в подземном пространстве // Уголь. 2018. № 3 (1104). С. 96–97.

10. Иофис М.А., Гришин А.В., Есина Е.Н. Сдвигение горных пород и земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. М.: РУДН, 2011. 103 с.

11. Терешин А.А., Негурица Д.Л., Кирков А.Е. Восстановление опорных реперов наблюдательных станций при деформационном мониторинге // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 1. С. 14–19.

12. Попов В.Н., Чекалин С.И. Геодезия: учебник. М.: Горная книга, 2012. 723 с.

13. Тамутис З.П. Проектирование инженерных геодезических сетей. М.: Недра, 1990. 138 с.

14. Altamimi Z., Gross R. Geodesy. Springer, 2017. Pp. 1039–1061. (Springer Handbooks).

15. Lehmann R., Neitzel F. Testing the compatibility of constraints for parameters of a geodetic adjustment model // Journal of Geodesy. 2013. Vol. 87. Issue 6. Pp. 555–566.

16. Velsink H. Testing methods for adjustment models with constraints // Journal of Surveying Engineering. 2018. Vol. 144. Issue 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000260)

17. Большаков В.Д., Маркузе Ю.И. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений. М.: Недра, 1984. 345 с.

18. Беляев Б.И. Практикум по математической обработке маркшейдерско-геодезических измерений. М.: Недра, 1989. 316 с.

19. Ěvoltová, J., Chromčák, J. Diagnostics of systematic errors in angle measurements // Procedia Engineering. 2015. Vol. 111. Pp. 339–343. doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.098.

## Для цитирования

Есина Е.Н., Лиходеевская В.В. Развитие методов уравнивания нивелирных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 58–65. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65>

## Development of methods for equalizing level networks

Ekaterina N. Esina

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,  
6 Kryukovskiy Dead End, Moscow, 111020, Russian Federation

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Vladislava V. Likhodeevskaya

LLC "SMU-6 Metrostroy", 29 Seleznevskaya St, bldg. 2, Moscow, 127473, Russian Federation

### Article history:

Received: April 11, 2020

Revised: May 16, 2020

Accepted: May 18, 2020

### Keywords:

geomonitoring, leveling networks, equalization, parametric equalization method, node method of Professor V.V. Popov

The article is devoted to comparison of methods of calculating the approximate elevations of nodal points when adjusting leveling networks by strict and non-strict methods. Ensuring geomechanical monitoring of the mutual influence of constructed and operated objects is important in the intensive development of underground space of megacities, the construction of unique objects and structures. In the course of the research, mathematical models of level networks were developed and presented in the form of a closed loop and a set of open polygons. Analysis of modeling allows to determine the feasibility of applying the knot method by Professor V.V. Popov instead of the parametric method of adjustment. It is established that the quality of the results of strict equalization depends entirely on the quality of measurements, since deviations from the true values do not exceed the measurement error. The research has shown that it is possible to simplify the processing of monitoring data and evaluation of various configuration options for leveling networks, using algorithms for calculating approximate marks of nodal points. This makes it easier to process monitoring results and evaluate various network configuration options while ensuring the required level of measurement accuracy.

### References

1. Kartoziya BA. Osvoenie podzemnogo prostranstva krupnyh gorodov. Novye tendencii [Development of underground space of large cities. New trends]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(S1):615–630. (In Russ.)
2. Broere W. Urban problems – underground solutions. *Advances in Underground Space Development: Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference of ACUUS*. 2013. p. 1528–1539. doi: 10.3850/978-981-07-3757-3RP-087-P012.
3. Makishin VN, Nikolaichuk DN. Principy formirovaniya podzemnyh transportnyh sistem megapolisov [Principles of formation of underground transport systems of megalopolises]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018;(S62):39–43. (In Russ.)
4. Glozman OS. Podzemnoe planirovanie Moskvy [Underground planning of Moscow]. *Housing construction*. 2016;(11):14–19. (In Russ.)

5. Trubetskoy KN, Iofis MA. Sostoyanie i problemy osvoeniya podzemnogo prostranstva goroda Moskvy [State and problems of development of the Moscow underground space]. *Mine Surveying Bulletin*. 2007;4(62):27–30. (In Russ.)
6. Iofis MA, Neguritsa DL. Monitoring sostoyaniya sooruzhenij pri deformirovanii ih osnovaniya [Monitoring of structures during deformation of their base]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2006;(10):138–143. (In Russ.)
7. Kaliampakos D. Underground development: a springboard to make city life better in the 21<sup>st</sup> century. *Procedia Engineering*. 2016;165:205–213.
8. Iofis MA. Problemy kompleksnogo osvoeniya territorij i podzemnogo prostranstva krupnyh gorodov i puti ih resheniya [Problems of complex development of territories and underground space of metropolis and ways to solve them]. *Mine Surveying Bulletin*. 2006;4(58):20. (In Russ.)
9. Kolesnikova LA. Ekologicheskie riski pri sozdanii ob"ektov gorodskoj infrastruktury v podzemnom prostranstve [Environmental risks in the creation of urban infrastructure in the underground space]. *Coal*. 2018;3(1104):96–97. (In Russ.)
10. Iofis MA, Grishin AV, Esina EN. *Sdvizhenie gornyh porod i zemnoj poverhnosti pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [The displacement of rocks and the Earth's*

Ekaterina N. Esina, senior researcher of ICEMR RAS, associate professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Web of Science ResearcherID: E-6092-2017, eLIBRARY SPIN-code: 9090-9868, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1685-2406>, esina-en@rudn.ru  
Vladislava V. Likhodeevskaya, shift surveyor of LLC "SMU-6 Metrostroy".

*surface during the development of mineral deposits*]: textbook. Moscow: RUDN University; 2011. (In Russ.)

11. Tereshin AA, Neguritsa DL, Kirkov AE. Vostanovlenie opornyh reperov nablyudatel'nyh stancij pri deformatsionnom monitoringe [Restoration of reference points of observation stations during deformation monitoring]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017; 18(1):14–19. (In Russ.)

12. Popov VN. *Geodeziya* [Geodesy]: textbook. Moscow: Gornaya kniga Publ.; 2012. (In Russ.)

13. Tamutis ZP. *Proektirovanie inzhenernyh geodezicheskikh setej* [Design of engineering geodetic networks]. Moscow: Nedra Publ.; 1990. (In Russ.)

14. Altamimi Z, Gross R. *Geodesy*. Springer Handbooks. Springer; 2017. p. 1039–1061.

15. Lehmann R, Neitzel F. Testing the compatibility of constraints for parameters of a geodetic adjustment model. *Journal of Geodesy*. 2013;87(6):555–566.

16. Velsink H. Testing methods for adjustment models with constraints. *Journal of Surveying Engineering*.

2018;144(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000260)

17. Bolshakov VD, Markuse YuI. *Praktikum po teorii matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmerenij* [Practicum of the theory of mathematical processing of geodetic measurements]. Moscow: Nedra Publ.; 1984. (In Russ.)

18. Belyaev BI. *Praktikum po matematicheskoy obrabotke markshejdersko-geodezicheskikh izmerenij* [Practicum of mathematical processing of surveying and geodesic measurements]. Moscow: Nedra Publ.; 1989. (In Russ.)

19. Ižvoltová J, Chromčák J. Diagnostics of systematic errors in angle measurements. *Procedia Engineering*. 2015;111:339–343. doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.098.

#### For citation

Esina EN, Likhodeevskaya VV. Development of methods for equalizing level networks. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):58–65. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65> (In Russ.)