

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ЗА СЧЕТ УЧЕТА ДРЕЙФА ГИРОАЗИМУТОВ

В.Н. Гусев¹, А.А. Пупоревич¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: puporevich.anna@gmail.com

Аннотация: Обозначены существующие проблемы, связанные с состоянием развития приборной базы гироскопического оборудования. Обоснована необходимость проведения гироскопического ориентирования при подземных работах. Проведен анализ существующих разработок гироскопического оборудования и сделан вывод, что вследствие малого спроса на оборудование и его специфичности работ ведется не так много, и на данном этапе промышленно выпускаемыми являются только торсионные гирокомпасы. Исследованы научные работы, посвященные оценке точности измерений торсионными гирокомпасами, благодаря чему обоснована актуальность данной статьи. Показаны возможные пути решения проблемы повышения точности ориентирования и выбран самый оптимальный вариант для нынешних условий, который предполагает новый способ расчетов гироазимута. Описаны необходимые приборы и инструменты для настоящего исследования, а также методы измерений и расчетов гироазимутот. Проведенный анализ позволил сделать вывод, что дрейф является систематической ошибкой, имеющей преобладающее влияние на конечную среднюю квадратичную ошибку пусков. Показано, что учет дрейфа значений гироазимутот в гиропроставке Sokkia может повысить точность ориентирования. Найдена зависимость значений гироазимутот от времени работы прибора. Предложен один из вариантов компенсации дрейфа за счет введения поправок в значения гироазимутот согласно этой зависимости.

Ключевые слова: гироскопическое ориентирование, гироазимут, гирокомпас, гиротеодолит, гиропроставка, дрейф, систематическая погрешность, точность измерений.

Для цитирования: Гусев В. Н., Пупоревич А. А. Повышение точности гироскопического ориентирования за счет учета дрейфа гироазимутот // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 134–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_134.

Improving accuracy of navigation using gyroscopes with regard to gyro drift and azimuth error

V.N. Gusev¹, A.A. Puporevich¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: puporevich.anna@gmail.com

Abstract: The article identifies the current problems in development of gyro instruments. Underground mining operations need navigation using gyroscopes. The existing gyro instruments are discussed. This specific equipment lacks demand, and only gyro compasses enjoy commer-

cialization. The review of the scientific works on the measurement accuracy of gyro compasses proves the timely character of this study. The ways of improving navigation accuracy are shown, and the optimal variant is selected for the current conditions, which assumes a new method of gyro azimuth calculation. The instruments and equipment required for the study, as well as the methods of gyro azimuth measurement and calculation are described. The azimuth error is a constant error which has a prevailing influence on the root mean squarer error of starting. Sokkia gyro stations take into account gyro drifts and azimuth errors, which can improve navigation accuracy. The values of gyro azimuths are correlated with the instrument operation time. It is proposed to compensate azimuth errors by adjusting the values of gyro azimuths using this correlation.

Key words: navigation using gyroscopes, gyro azimuth, gyro compass, gyro theodolite, gyro station, drift, constant error, measurement accuracy.

For citation: Gusev V. N., Puporevich A. A. Improving accuracy of navigation using gyroscopes with regard to gyro drift and azimuth error. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):134-145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_134.

Введение

Маркшейдерские гирокомпасы определено можно считать узкоспециализированными приборами. Они появились в первой половине XX в., активно начали применяться в 50-х годах и до сих пор, если говорить о подземных работах, альтернативы им не найдено [1]. Внедрение приборов в практику повысило надежность получаемых данных и оказало огромное влияние на совершенствование методики прокладки опорных поземных сетей [2]. Несмотря на огромный прогресс в развитии маркшейдерско-геодезического оборудования и методов ведения съемок — внедрение технологий спутниковых методов зондирования на поверхности [3] или использование фотограмметрических методов съемок под землей [4, 5], — достойной альтернативы гироскопическому ориентированию как средству повышения точности и надежности маркшейдерских сетей до сих пор не найдено. Фактически, сейчас в России можно выделить всего две лидирующие фирмы, которые поставляют свои приборы — Sokkia Торсон (гиронасадки GYRO X) в Японии и DMT (гирокомпасы Gyomat) в Германии. Та-

кая ситуация отчасти вызвана внедрением ГНСС в геодезическую практику, которая почти полностью вытеснила гироприборы на поверхности.

Согласно статье В.И. Глейзера и др. [6], на 2017 г. можно сказать о следующем распределении гироскопических приборов: на большинстве угольных предприятий используются произведенные еще в СССР торсионные взрывозащищенные гирокомпасы МВТ-2 и гирокомпасы МВГ1; для ориентирных съемок при проходке метрополитена в Санкт-Петербурге используются гирокомпасы марки Gi-B (производство MOM); компания «Уралкалий» и ряд других применяют более современные разработки, например, гиросстанции Sokkia GYRO X.

Несмотря на ограниченное применение гирокомпасов, в настоящее время все существующие технологии и методики маркшейдерского обеспечения подземных горных работ и подземного строительства невозможны без ориентирных съемок [7–15], а все возрастающие требования к качеству и скорости выполнения подземных разработок повышает требования и к точности гироскопического ориентирования.

Современные ученые по-разному подходят к решению проблемы получения необходимой точности измерений относительно стоимости работ. На данный момент ведутся исследования по созданию новых видов нероторных гирокомпасов. Предпринимаются попытки разработки маркшейдерских приборов, основанных на эффекте Саньяка (лазерные или оптические) [16–18]. Также в Китае ведутся полевые исследования гирокомпаса, где подвес чувствительного элемента выполнен с помощью технологии магнитной левитации [19–21], однако эта разработка далека до промышленного внедрения.

На сегодняшний день в промышленно выпускаемых гирокомпасах представлена только одна принципиальная схема работы: наблюдение за вынужденными колебаниями чувствительного элемента роторного типа, прецессирующего вокруг истинного меридиана. И так как на данный момент развития приборной базы нельзя говорить о скором внедрении в маркшейдерское обеспечение безроторных гирокомпасов, следовательно, необходимо работать с уже существующими инструментами [22]. В связи с указанными ограничениями при решении проблемы повышения точности актуальной необходимостью является либо нахождение способов совершенствования методики проведения ориентирования, либо получение новых способов расчетов гироазимутов для существующих приборов [23].

Высокая цена приборов и их специфичность обусловила малое количество исследований. В ряде научных работ, посвященных оценке точности гироприставки Sokkia GYRO [24–26], не исследованы влияния времени работы прибора на получаемые азимуты, хотя для маятниковых приборов дрейф был обнаружен еще полвека назад [27, 28]. В статье Л. Грегорсона [27] была сдела-

на попытка установить природу дрейфа значений гироазимутов, его зависимость от времени и способы его устранения для гиротеодолита Gi-B2. Данная статья во многом показательна, в ней был описан дрейф трех различных гиротеодолитов, при этом проводились серии экспериментов для разных внешних условий (температура, облачность, заряд аккумулятора и т.д.). Дрейф наблюдался всегда, и кривые, по которым изменялись значения азимуты, оставались практически неизменными. Это дает основание сделать вывод, что дрейф слабо зависит от внешних условий и является уникальным для каждого прибора, однако зависит от изначальной балансировки чувствительного элемента и ее изменения в ходе работы. Предполагается, что это изменение происходит из-за нагрева прибора. Так как работа гирокомпаса Gi-B2 и гироприставки Sokkia базируется на тех же физических законах [29] и конструктивно они схожи, можно предположить, что причины, вызывающие дрейф, одинаковы.

В данном исследовании предлагается повысить точность ориентирования при использовании торсионного гирокомпаса Sokkia на основе изучения дрейфа и его учета при дальнейших расчетах. Решение представленной задачи позволит повысить качество и точность маркшейдерского обеспечения при подземных работах.

Материалы и методы

Экспериментальная часть представляемой работы выполнялась с использованием гироскопической станции Sokkia GYRO 1X, которая является комбинацией гиронасадки и электронного роботизированного тахеометра модели SRX, заявленные средние квадратичные ошибки (СКО) которых 15" и 1" соответственно. СКО тахеометра значительно выше гироприставки [30, 31],

так что можно предположить, что для повышения точности необходимо проводить исследования гиросприставки. В дополнение использование роботизированного тахеометра позволяет исключить ошибки наблюдателя.

В приборе представлено два метода фиксации точек реверсии: по времени и последовательные измерения [32]. Был выбран второй способ из-за его более простой реализации — необходимость предварительного ориентирования на север с точностью до 2° (для первого способа предварительная ориентировка должна составлять $2'$) и меньшие требования к освобождению чувствительного элемента.

Все измерения проводились на консоли с принудительным центрированием, что исключало возможность установки прибора в разные положения при непоследовательных сериях измерений. В качестве цели использовалась светоотражающая призма, зафиксированная на стене, благодаря этому неточность установки визирной цели также была исключена. Подобное жесткое закрепление стороны могло гарантировать преемственность данных. Работы выполнялись при постоянной комнатной температуре.

Набор экспериментальных данных был получен во время трех пусков гиросприставкой на известной стороне. Всего было произведено два этапа исследований: первый служил для доказательства существования дрейфа и для нахождения возможных способов его компенсации, а на втором этапе ставилась цель использовать полученный способ компенсации для повышения точности ориентирования.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования наблюдалось максимально возможное количество точек реверсии — десять,

с записью времени взятия точек. Всего было проведено два цикла измерений. Каждый цикл выполнялся при постоянно включенном гиросприставке. Первый состоял из пяти пусков, и общее время продолжительности работы гиросприставке составило четыре часа. Второй цикл включал в себя четыре пуска продолжительностью примерно три с половиной часа. Каждый гиросприставке рассчитывался как среднее из точек реверсии по стандартной формуле [33]:

$$\Gamma = \frac{\frac{N_i + 2N_{i+1} + N_{i+2}}{4} + \frac{N_{i+1} + 2N_{i+2} + N_{i+3}}{4}}{2}, \quad (1)$$

где N_i — отсчет по горизонтальному кругу; i — количество точек реверсии.

Также была рассчитана СКО каждой серии наблюдений [31]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}, \quad (2)$$

где $[vv]$ — сумма квадратов отклонений от среднего значения; n — количество измерений.

СКО для первого цикла составляла $18''$, а для второго — $23''$, что ниже заявленной в характеристиках прибора ($15''$).

Проведя регрессионный анализ с использованием метода наименьших квадратов, получили зависимости значения гиросприставке от времени работы гиросприставке (рис. 1, 2).

Выполненный регрессионный анализ показал, что изменения в значениях полученных гиросприставке от времени работы гиросприставке носят систематический, нелинейный характер.

Для каждого этапа измерений была подобрана аппроксимирующая функция, наиболее полно описывающая характер дрейфа. Это оказалась логарифмическая функция, при этом для оценки качества подбора уравнения регрессии использовался коэффициент детерминации, который оказался достаточно вы-

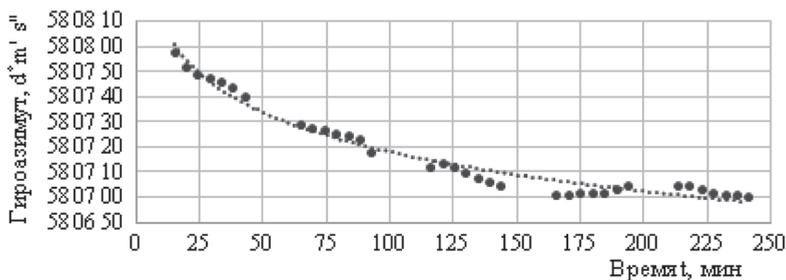


Рис. 1. Зависимость значений гироазимута от времени для первого цикла
 Fig. 1. Time dependence of gyro azimuth in the first cycle

сок (табл. 1), что служит подтверждением правильности подобранной функции.

Константа в полученных зависимостях характеризует начальную установку значения горизонтального угла, и ее без проблем можно исключить. Совместив два графика (рис. 3), отчетливо видим, что зависимость дрейфа гироазимута от времени работы гиromотора ведет себя стабильно для данного прибора и является систематической ошибкой — чем дольше работает гиromотор, тем большие отличия от первоначального гироазимута мы наблюдаем.

При этом для двух циклов вообще уравнение зависимости изменения гироазимута от времени будет:

$$\Gamma = -25,3'' \ln(t). \quad (3)$$

Также на совмещенном графике (см. рис. 3) можно наблюдать, что хоть первые пуски циклов и расходятся, но последующие, напротив, накладываются друг на друга. Это можно объяснить тем, что в первых пусках все еще влияет начальная температура прибора.

Для подтверждения гипотезы о возможности повышения точности за счет учета дрейфа была произведена сле-

Таблица 1

Зависимости, полученные при регрессионном анализе
Relations from regression analysis

Цикл	Полученная зависимость	Коэффициент детерминации
1	$\Gamma = -22,7'' \ln(t) + 58^{\circ}09'02,4''$	$R^2 = 0,967$
2	$\Gamma = -28,0'' \ln(t) + 180^{\circ}02'12,2''$	$R^2 = 0,976$

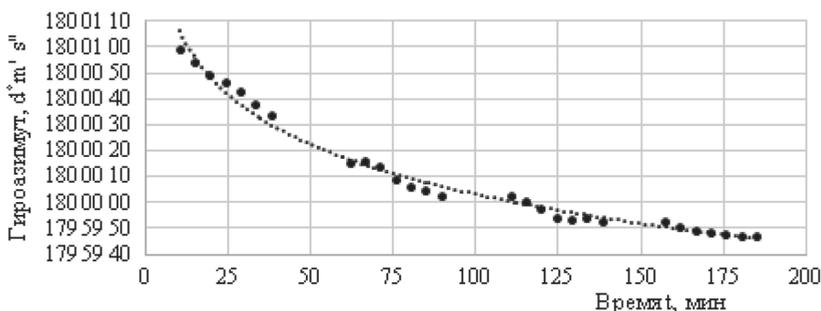


Рис. 2. Зависимость значений гироазимута от времени для второго цикла
 Fig. 2. Time dependence of gyro azimuth in the second cycle

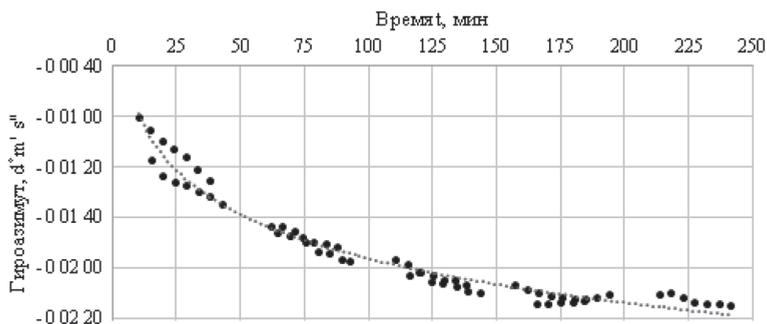


Рис. 3. Накладывание двух циклов измерений друг на друга

Fig. 3. Superposing of two measurement cycles

Таблица 2

Исправление значений азимута

Adjustment of azimuth values

Время мин	Гироазимут начальный		Поправка	Гироазимут исправленный	
	°	' "		°	' "
12,52	49	56 24		49	56 24
32,49	49	56 09	- 0 00 24	49	56 33
54,57	49	55 55	- 0 00 37	49	56 32
75,55	49	55 46	- 0 00 45	49	56 31
97,11	49	55 42	- 0 00 52	49	56 34
118,86	49	55 39	- 0 00 57	49	56 36
	СКО	0° 00'18"		СКО	0° 00'04"

дующая серия. Второй этап включал в себя серию из шести пусков, но уже по четырем точкам реверсии на той же стороне, общее время постоянной работы гиromотора составило примерно 2 ч.

Изначально гироазимуты также рассчитывались по формуле (1). Начальная

СКО измерений составляла порядка 18". Предполагалось, что, введя поправки согласно выявленной выше зависимости (3), мы сможем уменьшить значение ошибки. Расчеты приведены в табл. 2. Наглядное отображение исходного и исправленного пуска приведены на рис. 4.

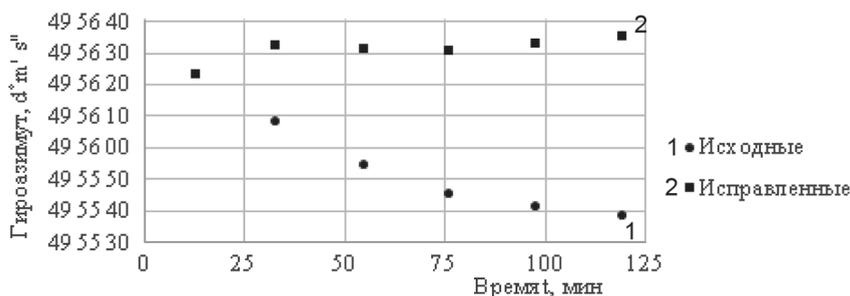


Рис. 4. Исходные и исправленные значения азимутов для второй серии измерений

Fig. 4. Initial and adjusted azimuths in the second measurement cycle

Как видно из табл. 2, с введением поправки значения СКО уменьшилось примерно в 4 раза и составило даже меньше паспортного значения.

Очевидно, что контроль внутренней сходимости по такой небольшой выборке позволяет получить только примерное значение СКО азимута и не учитывает факторы среды и методики измерений. Следует заметить, что такую высокую точность показывают лабораторные исследования, тогда как при реальных измерениях действуют и другие ошибки. Однако высокий коэффициент детерминации, определенный для общей зависимости дрейфа, позволяет сделать вывод о доминирующем влиянии систематической ошибки на фактическое значение гироазимута. Принимая все это во внимание, можно сказать, что подобная компенсация систематической погрешности все же увеличит точность измерений, но не до такой степени, как показано выше.

Все представленные выше зависимости характерны только для конкретного прибора в определенных условиях его работы, поэтому дальнейшие исследования, направленные на создание общей модели компенсации дрейфа, необходимы.

Заключение

Согласно проведенным исследованиям, дрейф, несомненно, можно считать систематической погрешностью прибора, и, так как систематические ошибки являются однонаправленными, их нельзя устранить усреднением значений. Они

особенно опасны своим накоплением во время работы, поэтому нахождение способа их компенсации является важным [34, 35].

После проведения анализа существующих ранее научных работ было выявлено, что дрейф появляется из-за изменения балансировки гиromотора внутри гирокамеры во время работы прибора. При этом дрейф не зависит от внешних условий работы, а связан с особенностями конструирования прибора. Так как сама гиromanция не имеет каких-либо конструкторских особенностей для компенсации разбалансировки, появилась необходимость нахождения зависимости, по которой происходит дрейф.

На основе двух длительных пусков была найдена зависимость изменения гироазимута от времени. Высокий коэффициент детерминации, определенный для общей зависимости дрейфа, позволяет сделать вывод о доминирующем влиянии нагрева мотора на фактическое значение гироазимута.

Третий пуск служил подтверждением гипотезы, что исключение систематической погрешности может повысить точность гиroomентирования. Действительно, введение поправки сократило СКО с 18" до 4".

Несмотря на ограниченность выборки, полученные результаты отображают общую тенденцию поиска и исправления систематической погрешности, вызванной нагревом прибора, и являются первым этапом разработки нового способа расчета гироазимуты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глейзер В. И., Молотов Р. В. Гироскопическое ориентирование и современная геодезия // Геопрофи. — 2012. — № 5. — С. 20 — 22.
2. Алексенко А. Г. Метрологические исследования маркшейдерского гирокомпасов МВТ-2 // Записки Горного института. — 2012. — № 196. — С. 48 — 51.
3. Ilyukhin D. A., Ivanik S. A., Vystrchil M. G., Kachan D., Savchenko A. Technologies for obtaining and processing of space radar images for monitoring the state of the Earth's surface //

Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012042.

4. *Vystrchil M. G., Sukhov A. K., Novozhenin S. U., Popov A. V., Guba S. A.* Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012089.

5. *Глейзер В. И., Владимирова Т. М.* Оценка неопределенности измерений маркшейдерского гирокомпас // Маркшейдерский вестник. — 2017. — № 6. — С. 24–30.

6. *Гусев В. Н., Волохов Е. М., Голованов В. А., Иванов И. П., Васильев М. Ю., Носов В. К., Юшманов П. И.* Методы оценки состояния гидротехнических тоннелей по данным лазерно-сканирующей съемки // Записки Горного института. — 2011. — № 190. — С. 267–273.

7. *Lewén I.* Use of gyrotheodolite in underground control network: Master's of Science Thesis in Geodesy. Kungliga Tekniska Högskolan, Sweden, 2006. 78 p.

8. *Novozhenin S. U., Vystrchil M. G.* New method of surface settlement prediction for Saint-Petersburg metro escalator tunnels excavated by EPB TBM // Procedia Engineering. 2016, vol. 150, pp. 2266–2271. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.283.

9. *Velasco-Gómez J., Prieto J. F., Molina I., Herrero T., Fábrega J., Pérez-Martín E.* Use of the gyrotheodolite in underground networks of long high-speed railway tunnels // Survey Review. 2016, vol. 48, no. 350, pp. 329–337. DOI: 10.1179/1752270615Y.0000000043.

10. *Vystrchil M. G., Novozhenin S. U., Mukminova D. Z.* Mathematical analysis of the subsidence curve approximation accuracy on the example of the function by SP Kolbenkov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. 2019, vol. 19, no. 2.2, pp. 207–213. DOI: 10.5593/sgem2019/2.2/509.026.

11. *Szafarczyk A., Młynarczyk J., Markiewicz Ł., Gawłkiewicz R.* Design, measurement and analysis of gyro-azimuths influence on the results of aligning the underground control network // Geoinformatica Polonica. 2017, vol. 16, pp. 77–86. DOI: 10.4467/21995923GP.17.006.7193.

12. *Heunecke O., Liebl W.* Zur orientierungskontrolle von vortriebsnetzen mit vermessungskreiseln // ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. 2017, vol. 6, no. 142, pp. 317–326. DOI: 10.12902/zfv-0183-2017.

13. *Novozhenin S. U., Vystrchil M. G., Bogdanova K. A.* Analysis of the mathematical modelling results of displacements and deformations induced by the construction of the escalator tunnel of «Mining Institute» station in Saint Petersburg // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012105. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012105.

14. *Heunecke O., Liebl W.* Accuracy and reliability of gyro measurements at today's tunneling projects // Journal of Applied Geodesy. 2018, vol. 12, no. 1, pp. 95–107. DOI: 10.1515/jag-2017-0035.

15. *Szafarczyk A., Gawłkiewicz R.* The possibilities of the application of gyroscope instruments in the assessment of the rock mass stability // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. 2018, vol. 18, no. 2.2, pp. 1059–1066. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2

16. *Голяев Ю. Д., Дронов И. В., Колбас Ю. Ю., Прядеин В. А., Шпикалов Б. Н.* Малогабаритный гирокомпас на квазичетырехчастотном лазерном гироскопе // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. — 2012. — № 3. — С. 112–125.

17. *Чернов И. В.* Повышение точности определения азимутов с использованием лазерных гирокомпасов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2016. — № 6. — С. 27–32.

18. *Shamilov L. N., Gordeev V. A., Manyko N. G., Badulin A. P., Shestakov G. V., Shtykov A. N.* Development and experimental studies of highly sensitive fibre-optic sensors for gyrocompasses // XV International ISM Congress. Aachen. 2013, pp. 98–102.

19. *Yang Z., Shi Z., Yang J., Yang S., Huang D.* The Research of key technology and superiority in magnetic suspension gyro station and application in underground engineering // International Conference on Multimedia Technology. Ningbo. 2010, pp. 1–3.

20. Zhen S., Zhiqiang Y., Zhe Z. Study on automatic north-seeking key technologies of Maglev gyroscope // *The Open Mechanical Engineering Journal*. 2013, vol. 7, no. 1, pp. 83–89.
21. Ma J., Yang Z., Shi Z., Liu C., Yin H., Zhang X. Adjustment options for a survey network with magnetic levitation gyro data in an immersed under-sea tunnel // *Survey Review*. 2019, vol. 51, no. 367, pp. 373–386. DOI: 10.1080/00396265.2018.1563376.
22. Гура Д. А. Разработка методов исследования электронных тахеометров в условиях производства для оценки и повышения точности измерения горизонтальных углов: Дис. канд. техн. наук. — М.: МИИГАиК, 2016. — 181 с.
23. Jeudy L. M. A. Multiple transit times and least squares for gyroscopic azimuth // *Bulletin Gæodésique*. 1986, vol. 60, no. 4, pp. 288–296. DOI: 10.1007/BF02522337.
24. Bezdiček V., Dandoš R., Konečný M., Kotrbánek J., Král T., Wlochová A. Orientation measurement with gyrotheodolite // *Geodesy and Cartography*. 2018, vol. 44, no. 3, pp. 100–105. DOI: 10.3846/gac.2018.2683.
25. Szafarczyk A., Skaba A., Sokalla K. Implementation of gyroscope measurements in underground mines; focus on the mine of ruch (unit) «Borynia» in the Jastrzębie Coal Company // *Geoinformatica Polonica*. 2019, vol. 18, pp. 113–120. DOI: 10.4467/21995923GP.19.009.1576.
26. Dandoš R., Bezdiček V., Wlochová A. Accuracy of determination of azimuth with a gyrotheodolite by the follow-up measurement // *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13, no. 5, pp. 1–7. DOI: 10.1007/s12517-020-5129-y.
27. Gregerson L. F. An investigation of the MOM GiB2 gyroscopic theodolite // *The Canadian Surveyor*. 1970, vol. 24, no. 1, pp. 117–135.
28. Воронков Н. Н., Кутырев В. В., Ашимов Н. М. Гироскопическое ориентирование. — М.: Недра, 1973. — 234 с.
29. Глейзер В. И., Кон М. С. Новый прибор для гироскопического ориентирования // *Маркшейдерский вестник*. — 2013. — № 4. — С. 19–21.
30. Vystrčil M. G., Novozhenin S. U. Estimation of autolock mode accuracy of robotic total stations with various configurations reflectors // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. 2017, vol. 17, pp. 281–287. DOI: 10.5593/sgem2017/22/S09.035.
31. Palkin P. O., Kuzin A. A. Using high accuracy geodetic measurements to fix the main bases of the ship in shipbuilding and ship-repairing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1728, no. 1, article 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012015
32. Руководство по эксплуатации Sokkia GyroX. — Sokkiatorcon Co., LTD, 2011. — 60 с.
33. Русяева А. В. Теория математической обработки геодезических измерений: учебное пособие. Ч. I. Теория ошибок измерений. — М.: МИИГАиК, 2016. — 56 с.
34. Голованов В. А. Метрологический контроль при ведении маркшейдерских работ // *Записки Горного института*. — 2013. — № 204. — С. 122–126.
35. Жданев О. В., Зайцев А. В., Лобанков В. М. Метрологическое обеспечение аппаратуры для геофизических исследований // *Записки Горного Института*. — 2021. — № 246. — С. 667–677. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.9. **ПИАБ**

REFERENCES

- Gleyzer V. I., Molotov R. V. Gyroscopic orientation and modern geodesy. *Geoprofi*. 2012, no. 5, pp. 20–22. [In Russ].
- Aleksenko A. G. Gyrocompass MVT-2 metrological researches. *Journal of Mining Institute*. 2012, no. 196, pp. 48–51. [In Russ].
- Ilyukhin D. A., Ivanik S. A., Vystrčil M. G., Kachan D., Savchenko A. Technologies for obtaining and processing of space radar images for monitoring the state of the Earth's surface.

Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012042.

4. Vystrchil M. G., Sukhov A. K., Novozhenin S. U., Popov A. V., Guba S. A. Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012089.

5. Gleyzer V. I., Vladimirova T. M. Evaluation of measurement uncertainty mine surveying gyrocompass. *Mine Surveying Bulletin*. 2017, no. 6, pp. 24–30.

6. Gusev V. N., Volohov E. M., Golovanov V. A., Ivanov I. P., Vasiliev M. Yu., Nosov V. K., Yushmanov P. I. Methods of the estimation of the condition of hydraulic engineering tunnels according to laser-scanning survey. *Journal of Mining Institute*. 2011, no. 190, pp. 267–273. [In Russ].

7. Lewén I. *Use of gyrotheodolite in underground control network*: Master's of Science Thesis in Geodesy. Kungliga Tekniska Högskolan, Sweden, 2006. 78 p.

8. Novozhenin S. U., Vystrchil M. G. New method of surface settlement prediction for Saint-Petersburg metro escalator tunnels excavated by EPB TBM. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 2266–2271. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.283.

9. Velasco-Gómez J., Prieto J. F., Molina I., Herrero T., Fábrega J., Pérez-Martín E. Use of the gyrotheodolite in underground networks of long high-speed railway tunnels. *Survey Review*. 2016, vol. 48, no. 350, pp. 329–337. DOI: 10.1179/1752270615Y.0000000043.

10. Vystrchil M. G., Novozhenin S. U., Mukminova D. Z. Mathematical analysis of the subsidence curve approximation accuracy on the example of the function by SP Kolbenkov. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. 2019, vol. 19, no. 2.2, pp. 207–213. DOI: 10.5593/sgem2019/2.2/S09.026.

11. Szafarczyk A., Młynarczyk J., Markiewicz Ł., Gawatkiewicz R. Design, measurement and analysis of gyro-azimuths influence on the results of aligning the underground control network. *Geoinformatica Polonica*. 2017, vol. 16, pp. 77–86. DOI: 10.4467/21995923GP.17.006.7193.

12. Heunecke O., Liebl W. Zur orientierungskontrolle von vortriebsnetzen mit vermessungskreiseln. *ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. 2017, vol. 6, no. 142, pp. 317–326. DOI: 10.12902/zfv-0183-2017.

13. Novozhenin S. U., Vystrchil M. G., Bogdanova K. A. Analysis of the mathematical modelling results of displacements and deformations induced by the construction of the escalator tunnel of «Mining Institute» station in Saint Petersburg. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012105. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012105.

14. Heunecke O., Liebl W. Accuracy and reliability of gyro measurements at today's tunnelling projects. *Journal of Applied Geodesy*. 2018, vol. 12, no. 1, pp. 95–107. DOI: 10.1515/jag-2017-0035.

15. Szafarczyk A., Gawatkiewicz R. The possibilities of the application of gyroscope instruments in the assesment of the rock mass stability. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. 2018, vol. 18, no. 2.2, pp. 1059–1066. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2

16. Golyaev Yu. D., Dronov I. V., Kolbas Yu. Yu., Pryadein V. A., Shpikalov B. N. Small-size gyrocompass on quasi-four-frequency laser gyroscope. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2012, no. 3, pp. 112–125. [In Russ].

17. Chernov I. V. Improving the accuracy of determining the azimuth using laser gyrotheodolite. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2016, no. 6, pp. 27–32. [In Russ].

18. Shamilov L. N., Gordeev V. A., Manyko N. G., Badulin A. P., Shestakov G. V., Shtykov A. N. Development and experimental studies of highly sensitive fibre-optic sensors for gyrocompasses. *XV International ISM Congress. Aachen*. 2013, pp. 98–102.

19. Yang Z., Shi Z., Yang J., Yang S., Huang D. The research of key technology and superiority in magnetic suspension gyro station and application in underground engineering. *International Conference on Multimedia Technology. Ningbo*. 2010, pp. 1–3.

20. Zhen S., Zhiqiang Y., Zhe Z. Study on automatic north-seeking key technologies of Maglev gyroscope. *The Open Mechanical Engineering Journal*. 2013, vol. 7, no. 1, pp. 83 – 89.
21. Ma J., Yang Z., Shi Z., Liu C., Yin H., Zhang X. Adjustment options for a survey network with magnetic levitation gyro data in an immersed under-sea tunnel. *Survey Review*. 2019, vol. 51, no. 367, pp. 373 – 386. DOI: 10.1080/00396265.2018.1563376.
22. Gura D. A. *Razrabotka metodov issledovaniya elektronnykh takheometrov v usloviyakh proizvodstva dlya otsenki i povysheniya tochnosti izmereniya gorizontallykh uglov* [Development of methods for the study of electronic total stations in a manufacturing environment to evaluate and improve the accuracy of measuring horizontal angles], Candidate's thesis, Moscow, MIIGAiK, 2016, 181 p.
23. Jeudy L. M. A. Multiple transit times and least squares for gyroscopic azimuth. *Bulletin Gæodésique*. 1986, vol. 60, no. 4, pp. 288 – 296. DOI: 10.1007/BF02522337.
24. Bezdiček V., Dandoš R., Konečný M., Kotrbánek J., Král T., Wlochová A. Orientation measurement with gyrotheodolite. *Geodesy and Cartography*. 2018, vol. 44, no. 3, pp. 100 – 105. DOI: 10.3846/gac.2018.2683.
25. Szafarczyk A., Skaba A., Sokalla K. Implementation of gyroscope measurements in underground mines; focus on the mine of ruch (unit) «Borynia» in the Jastrzębie Coal Company. *Geoinformatica Polonica*. 2019, vol. 18, pp. 113 – 120. DOI: 10.4467/21995923GP.19.009.11576.
26. Dandoš R., Bezdiček V., Wlochová A. Accuracy of determination of azimuth with a gyrotheodolite by the follow-up measurement. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13, no. 5, pp. 1 – 7. DOI: 10.1007/s12517-020-5129-y.
27. Gregerson L. F. An investigation of the MOM GiB2 gyroscopic theodolite. *The Canadian Surveyor*. 1970, vol. 24, no. 1, pp. 117 – 135.
28. Voronkov N. N., Kutyrev V. V., Ashimov N. M. *Giroskopicheskoe orientirovanie* [Gyroscopic orientation], Moscow, Nedra, 1973, 234 p.
29. Gleyzer V. I., Kon M. S. New device used for gyroscopic orientation. *Mine Surveying Bulletin*. 2013, no. 4, pp. 19 – 21. [In Russ].
30. Vystřichil M. G., Novozhenin S. U. Estimation of autolock mode accuracy of robotic total stations with various configurations reflectors. *International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference: SGEM*. 2017, vol. 17, pp. 281 – 287. DOI: 10.5593/sgem2017/22/S09.035.
31. Palkin P. O., Kuzin A. A. Using high accuracy geodetic measurements to fix the main bases of the ship in shipbuilding and ship-repairing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1728, no. 1, article 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012015
32. *Rukovodstvo po ekspluatatsii Sokkia GyroX* [Sokkia GyroX instruction manual], Sokkiatorcon Co., LTD, 2011, 60 p. [In Russ].
33. Rusaeva A. V. *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy: uchebnoe posobie. Ch. I. Teoriya oshibok izmereniy* [Theory of mathematical processing of geodetic measurements. Part I: Theory of measurement errors], Moscow, MIIGAiK, 2016, 56 p.
34. Golovanov V. A. Metrological control administered surveying work. *Journal of Mining Institute*. 2013, no. 204, pp. 122 – 126. [In Russ].
35. Zhdaneev O. V., Zaitsev A. V., Lobankov V. M. Metrological support for the logging while drilling and wireline equipment. *Journal of Mining Institute*. 2021, no. 246, pp. 667 – 677. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гусев Владимир Николаевич¹ – д-р техн. наук, профессор, e-mail: kmd@spmi.ru,

Пупоревич Анна Андреевна¹ – аспирант,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Пупоревич А.А., e-mail: puporevich.anna@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Gusev¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: kmd@spmi.ru,

A.A. Puporevich¹, Graduate Student,

¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A.A. Puporevich, e-mail: puporevich.anna@gmail.com.

Получена редакцией 26.04.2021; получена после рецензии 03.06.2021; принята к печати 10.09.2021.

Received by the editors 26.04.2021; received after the review 03.06.2021; accepted for printing 10.09.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭКСКАВАЦИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ (2021, № 4, СБ 10, 20 с.)

*Якупов Дмитрий Радикович*¹ — аспирант, e-mail: s195037@stud.spmi.ru,

*Мотяков Николай Юрьевич*¹ — аспирант, e-mail: s205031@stud.spmi.ru,

*Иванова Полина Викторовна*¹ — канд. техн. наук, ассистент кафедры,

*Иванов Сергей Леонидович*¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Предложена классификация средств и рабочего оборудования для экскавации полезных ископаемых. По принципу выполняемых работ средства разделены на две группы: циклического и непрерывного действия. Выделены три типа трансмиссии: гидравлическая, механическая и комбинированная. В зависимости от типа перемещения выделено восемь видов: колесный, гусеничный, шнековый, рельсовый ход, шагания, понтон и мост, канатный и комбинированный. Выявлено шесть типов средств экскавации: прямая (обратная) лопата, роторный, цепной, драглайн, скрепер и комбинированный. Расписаны соответствующие типам средств экскавации типы рабочего органа, которые, в свою очередь, глобально разделяются на пассивные и активные группы по видам активности рабочего органа. Рассмотрены виды ковшей и рукоятей. Приведены примеры модернизированных или специальных средств экскавации, описаны специальные случаи применения. Описана проблема экскавации влажных грунтов, торфов и полезных ископаемых из затопленных забоев. Даны требования к ковшам. Описаны сложности позиционирования рабочего оборудования.

Ключевые слова: средство экскавации, экскаватор, гидравлический, механический, виды ковшей, классификация, драглайн, шнек, скрепер, грейфер, торф, позиционирование.

WORKING PARTS OF MEANS OF MINERALS EXCAVATION

*D.R. Iakupov*¹, Graduate Student, e-mail: s195037@stud.spmi.ru,

*N.Yu. Motyakov*¹, Graduate Student, e-mail: s205031@stud.spmi.ru,

*P.V. Ivanova*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of Chair, e-mail: Ivanova_PV@pers.spmi.ru,

*S.L. Ivanov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

We present a classification of means of minerals excavation and their working parts. The means are differentiated between two operation principles: cyclic action and continuous action. We include in our classification three types of transmission: hydraulic, mechanic, and combined. Means of excavation are also differentiated by 8 positioning methods: wheel drive, screw drive, rail travel, walking, hull and bridge positioning, rope hauling, and combined methods. Six types of excavating means are included: face (back) shovel, rotor, chain, dragline, scraper, and combined. We also assigned each type of excavation means a working body that can be active or passive. This article also covers various types of buckets and arms. Several examples of modern or special means of excavation are provided, along with descriptions of special use cases. Challenging excavation of moisturized soil, peat, and minerals arising from inundated working faces is also described. We also indicate bucket requirements and difficulties encountered during working parts positioning.

Key words: means of excavation, excavator, hydraulic, mechanic, bucket types, classification, dragline, screw, scraper, grab, peat, positioning.