

УДК 528.94  
DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-124-137

## Исследование точности определения пространственного положения железнодорожного пути путеизмерительной тележкой Gedo

Ф. Х. Ниязгулов<sup>1\*</sup>, А. В. Кривоус<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация,  
\*e-mail: filyuz1989@yandex.ru

**Аннотация.** Реализация концепции комплексного развития научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» предусматривает развитие цифровых технологий по всем направлениям деятельности ОАО «РЖД», в том числе в путевом хозяйстве. В целях мониторинга текущего состояния пути создаются и поддерживаются на уровне современных требований цифровые модели пути (ЦМП), используемые для сбора, хранения и оценки пространственных данных о текущем состоянии пути и выработки рекомендаций по предупреждению и устранению выявленных неисправностей. Наиболее действенным и универсальным средством контроля и выправки пути является координатный метод, основанный на системе непрерывного координатно-цифрового описания пути в единой системе координат. Широко используемые в сети железных дорог вагоны-путеизмерители не позволяют получать геометрические параметры пути в единой системе координат. Из-за этого в нашей стране и в зарубежных странах разработаны и применяют различные путеизмерительные системы, позволяющие получить ЦМП в координатах. Поэтому целью теоретических и экспериментальных исследований является выявление точности определения геометрических параметров железнодорожного пути с использованием путеизмерительной тележки Gedo. Рассмотрены методика определений геометрии пути, технические характеристики и отличительные особенности путеизмерительной тележки Gedo. Описана программа экспериментальных исследований и приведены сравнительные оценки точности определений геометрии железнодорожного пути геодезическим методом, с помощью путеизмерительной тележки Gedo и путевого шаблона. Показано, что в связи с переходом железнодорожной отрасли к цифровым технологиям моделирования объектов инфраструктуры наиболее целесообразно использовать для мониторинга геометрии железнодорожного пути путеизмерительную тележку Gedo, которая обеспечивает требуемую точность определения геометрии пути, производительность и получение необходимой информации в единой системе координат.

**Ключевые слова:** мониторинг, геодезия, геометрия железнодорожного пути, точность, электронный тахеометр, путеизмерительная тележка, нивелир, путевой шаблон, средняя квадратическая погрешность

### Введение

Вопросы диагностики железнодорожного пути и его элементов, обеспечение проектного положения пути при его текущем содержании и капитальном ремонте, требования к безопасности движения поездов и т. д. вызывают необходимость в определении геометрических параметров пути и его мониторинге на основе использования современных цифровых методов и технологий [1]. Виды, порядок и сроки определения состояния пути и их сооружений установлены документами [2–4].

Периодичность контроля параметров колеи зависит от эксплуатационных условий, конструкции пути и ее состояния, инженерно-геологических условий района и особенностей действующих природно-климатических факторов [5, 6].

Для комплексной диагностики технического состояния пути и сооружений применяются различного рода инструментальные средства, в том числе путеизмерительные вагоны, вагоны-дефектоскопы, лаборатории по дефектоскопии, путеизмерительные тележки с разнообразными функциями. Для оперативного определения геометрии пути используют ручные переносные путевые шаблоны различной конструкции [7, 8].

С целью повышения точности содержания проектного положения пути на железных дорогах многих стран (в Германии, Франции, Бельгии, Польши, Чехии, Австрии и др.) широко используют специальную реперную систему контроля состояния железнодорожного пути в профиле и в плане [9, 10].

На участках с реперной системой, работы, связанные с ремонтом и выправкой пути, вы-

полняются на основе данных о его проектном положении, закрепленном относительно реперов, которые позволяют реализовать наиболее перспективный на сегодняшний день абсолютный метод контроля проектного положения пути в единой геодезической системе координат [11, 12]. Реализация этого метода стала возможной с появлением и развитием оптико-электронных трехкоординатных датчиков (в том числе электронных тахеометров) и технологии глобального позиционирования. В рамках абсолютного метода геометрические параметры (кривизна в плане и продольном профиле, уклон продольного профиля) вычисляются по пространственным координатам точек пути.

В настоящее время для контроля положения железнодорожного пути стали использовать путеизмерительные тележки, где реализован абсолютный метод. Для этого эти тележки оснащены электронным тахеометром либо GPS-приемником. По данным рекламных проспектов, путеизмерительные тележки с электронным тахеометром обеспечивают погрешность измерения координат пути в продольном профиле и плане 1–2 мм. Путеизмерительные тележки со спутниковым приемником в стационарном режиме обеспечивают погрешность 4–8 мм. В движении использование GPS приводит к еще более грубым ошибкам [13–15].

Многочисленные исследования по выявлению точности определения геометрии пути проводились с использованием АПК «Профиль», разработанным в Сибирском государственном университете путей сообщения [16–18].

В данной работе представлены результаты сравнительной оценки точности определений геометрии железнодорожного пути методом геодезических измерений с помощью путеизмерительной тележки Gedo и путейского шаблона.

### Методология проведения исследования

Для выявления точности определения геометрических параметров рельсовой колеи вышеприведенными методами, на участке электрифицированной железной дороги общего пользования длиной 2,5 км были выполнены экспериментальные работы. В районе этого участка была создана опорная плано-вы-

сотная геодезическая и реперная сети с соблюдением требований [19].

На главных путях край каждой десятой шпалы были покрашены краской и в створе этих краев шпал наносились отметки на шейке рельсов, для определения ширины колеи и отметок головок рельсов.

При геодезическом методе определения геометрии рельсовой колеи и других его элементов основным являлся метод полярных координат на основе созданной геодезической сети с использованием электронных тахеометров.

Средняя квадратическая погрешность  $m_{(x,y)}$  определения координат точек методом полярных координат может быть выражена формулой

$$m_{(x,y)} = \sqrt{(m_p^2 + m_{исх}^2 + m_{ц}^2 + m_y^2)}, \quad (1)$$

где  $m_p$  – средняя квадратическая погрешность способа определения координат точки;  $m_{исх}$  – средняя квадратическая погрешность определения координат опорных точек;  $m_{ц}$  – средняя квадратическая погрешность центрирования прибора;  $m_y$  – средняя квадратическая погрешность установления отражателя над определяемой точкой.

Рассмотрим влияние этих погрешностей на точность определения координат измеряемых точек.

В способе полярных координат на погрешность определения координат влияют погрешности измерения горизонтального угла  $m_\beta$  и погрешность измерения полярного расстояния  $m_d$  и выражается формулой

$$m_p = \sqrt{(m_\beta / \rho'')^2 \times d^2 + m_d^2}, \quad (2)$$

где  $d$  – горизонтальное проложение от инструмента до определяемой точки;  $m_d$  – средняя квадратическая погрешность горизонтального проложения и составляет, как правило  $m_d = \pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm} * d)$ , где  $d$  – горизонтальное проложение в километрах.

Выполним по формуле (2) расчет ожидаемой погрешности определения положений точек пути способом полярных координат из-за

ошибок измерения горизонтального угла  $m_\beta$  и горизонтального проложения  $m_d$  (табл. 1).

Таблица 1

Средние квадратические погрешности определения координат точек, вычисленные по формуле (2)

Средние квадратические погрешности измерения горизонтального угла $m_\beta$ , с	Длины сторон до определяемых точек $d$ , м					
	20		50		100	
	Средние квадратические погрешности горизонтального проложения $m_d$ , мм					
	2	3	2	3	2	3
1	2,00	3,00	2,01	3,01	2,06	3,04
2	2,01	3,01	2,06	3,04	2,22	3,15
5	2,06	3,04	2,34	3,23	3,14	3,85

Выполненные расчеты (табл. 1) показывают следующие.

1. Влияние погрешности измерения горизонтального угла несущественно влияют на погрешности положения в плане определяемых точек.

2. Увеличение погрешности измерения расстояния на 1 мм, погрешность положения определяемой точки возрастает в полтора раза.

3. Погрешность измерения углов (в линейной форме) и расстояний не одинаково влияет на погрешность определяемых точек, т. е.  $\frac{m_\beta}{\rho} \cdot d < m_d$ , поэтому в формуле (2) применять принцип равных влияний некорректно. Из-за этого рекомендуют использовать коэффициент  $\lambda$ , вычисляемый по формуле

$$\lambda = \frac{m_d}{m_\beta} \cdot \frac{\rho''}{d} \quad (3)$$

С учетом формулы (3), формулу (2) можно представить в виде

$$m_p = m_d \sqrt{\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2}} \quad (4)$$

или

$$m_p = \frac{m_\beta d}{\rho''} \sqrt{\lambda^2 + 1} \quad (5)$$

Тогда вычислим по формулам (4) и (5) погрешности  $m_p$  в определении координат точек методом полярных координат (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Средние квадратические погрешности определения положения точки, определенного способом полярных координат, вычисленные по формуле (4), мм

Средние квадратические погрешности измерения горизонтального угла $m_\beta$ , с	Длины сторон до определяемых точек $d$ , м					
	20		50		100	
	Средние квадратические погрешности измерения расстояния $m_d$ , мм					
	2	3	2	3	2	3
1	2,00 $\lambda=20,63$	3,00 $\lambda=30,94$	2,01 $\lambda=8,25$	3,01 $\lambda=12,38$	2,06 $\lambda=4,13$	3,04 $\lambda=6,19$
2	2,01 $\lambda=10,31$	3,01 $\lambda=15,47$	2,07 $\lambda=4,13$	3,05 $\lambda=6,19$	2,29 $\lambda=2,06$	3,19 $\lambda=3,09$
5	2,07 $\lambda=4,13$	3,05 $\lambda=6,19$	2,42 $\lambda=1,65$	3,29 $\lambda=2,48$	3,59 $\lambda=0,83$	4,11 $\lambda=1,24$

Таблица 3

Средние квадратические погрешности определения положения точки, определенного способом полярных координат, вычисленные по формуле (5), мм

Средние квадратические погрешности измерения горизонтального угла $m_{\beta}$ , с	Горизонтальные проложения $d$ , м								
	20			50			100		
	Средние квадратические погрешности измерения расстояния $m_d$ , мм								
	2	3	5	2	3	5	2	3	5
1	2,00 $\lambda=20,63$	3,00 $\lambda=30,94$	5,00 $\lambda=51,57$	2,01 $\lambda=8,2$ 5	3,01 $\lambda=12$ ,38	5,01 $\lambda=20$ ,63	2,06 $\lambda=4,$ 13	3,04 $\lambda=6,$ 19	5,02 $\lambda=10,$ 31
2	2,01 $\lambda=10,31$	3,01 $\lambda=15,47$	5,00 $\lambda=25,78$	2,06 $\lambda=4,1$ 3	3,04 $\lambda=6,$ 19	5,02 $\lambda=10$ ,31	2,22 $\lambda=2,$ 06	3,15 $\lambda=3,$ 09	5,09 $\lambda=5,1$ 6
5	2,06 $\lambda=4,13$	3,04 $\lambda=6,19$	5,02 $\lambda=10,31$	2,36 $\lambda=1,6$ 5	3,25 $\lambda=2,$ 48	5,15 $\lambda=4,$ 13	3,23 $\lambda=0,$ 83	3,91 $\lambda=1,$ 24	5,58 $\lambda=2,0$ 6

Результаты вычислений по формулам (4) и (5) показывают, практически, одинаковые результаты. В то же время, эти результаты не существенно отличаются от результатов вычислений в табл. 1. Это говорит о том, что в нашем случае применять коэффициент  $\lambda$  не рационально.

В погрешности, вычисленные в табл. 1 необходимо ввести погрешности центрирования прибора  $m_{\text{ц}}$  и погрешности установки отражателя  $m_{\text{у}}$ .

Обычно погрешность центрирования с помощью оптического центрирования принимают равной  $m_{\text{ц}} = \pm 1$  мм.

Для совмещения центра отражателя с рабочей гранью рельса использовали специальные устройства, имеющие форму уголка (рис. 1).

Боковая поверхность устройства имеет два мощных магнита, с помощью которых устройство плотно прижимается к рабочей грани рельса. Сверху устройство также имеет мощный цилиндрической формы магнит, который плотно прижимает верхнюю часть устройства к головке рельса.

Кроме того, верхняя часть устройства имеет круглый уровень для приведения верхней поверхности устройства в горизонтальное положение.

На верхней плоскости закреплен штифт для установки отражателя. В центре головки штифта просверлено отверстие диаметром 0,5 мм. После прикладывания устройства к рельсу и приведения его в горизонтальное положение с помощью круглого уровня центр отверстия штифта на устройстве точно совпадает с рабочей гранью рельса.

Примем среднюю квадратическую погрешность установки отражателей при помощи устройств равными  $m_{\text{у}} = \pm 1$  мм.

Приняв  $m_{\text{ц}} = \pm 1$  мм и  $m_{\text{у}} = \pm 1$  мм и с учетом данных таблицы 1, вычислим погрешность определения координат рабочих граней рельсов полярным способом по формуле (табл. 4)

$$m_{x,y} = \sqrt{m_p^2 + m_{\text{ц}}^2 + m_{\text{у}}^2} \quad (6)$$

В формуле (6) и в табл. 4 отсутствует погрешности исходных данных. В данной работе ставится задача определения не абсолютной погрешности определения геометрии пути, а относительной погрешности, т. е. погрешности определения взаимного положения геометрических параметров пути.

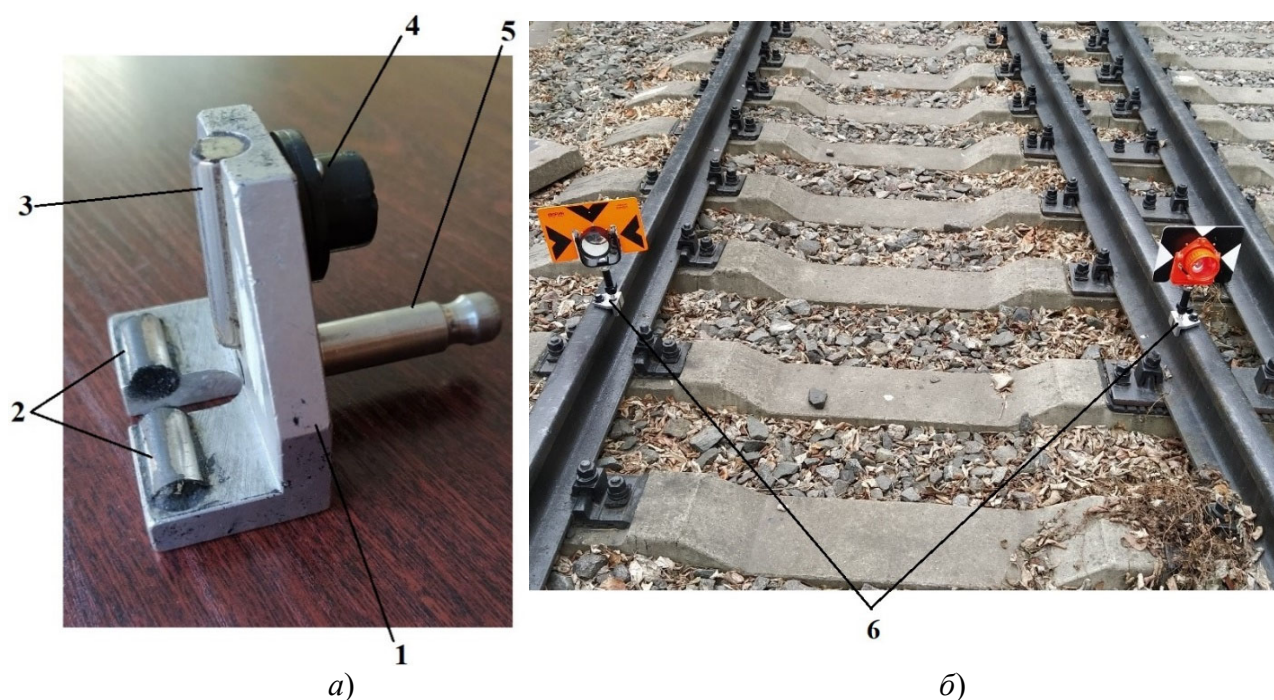


Рис. 1. Устройства для совмещения центра отражателя с рабочей гранью рельса:

а) без отражателя; б) с отражателями, установленные на головках рельсов, для измерения геометрических параметров рельсовой колеи: 1 – корпус устройства для установки отражателя; 2 – магниты, прикрепляющие устройство рабочей грани рельса; 3 – магнит для прижима устройства к головке рельса; 4 – круглый уровень, для приведения устройства в горизонтальное положение; 5 – шток, для установки отражателя, центр которого совпадает с рабочей гранью рельса; 6 – отражатели, установленные на штоки

Таблица 4

Средние квадратические погрешности определения координат точек в миллиметрах, вычисленные по формуле (6)

Средние квадратические погрешности измерения горизонтального угла $m_{\beta}$ , с	Длины сторон до определяемых точек $d$ , в м								
	20			50			100		
	Средние квадратические погрешности измерения расстояния $m_d$ , мм								
	2	3	5	2	3	5	2	3	5
1	2,45	3,32	5,20	2,46	3,33	5,20	2,50	3,35	5,22
2	2,46	3,32	5,20	2,51	3,36	5,22	2,69	3,49	5,31
5	2,51	3,36	5,22	2,81	3,58	5,36	3,86	4,34	5,86

Результаты вычислений в табл. 4 показывают, следующее.

1. Погрешности измерения горизонтального угла незначительно влияют на ошибку определения положения точек в плане.
2. Существенное влияние на ошибку определения положения точек в плане оказывают погрешности измерения расстояний.
3. Если ширина колеи вычисляется из решения обратной геодезической задачи по координатам рабочих граней рельсов пути, тогда средние квадратические погрешности, вычисленные в табл. 4, нужно умножить на  $\sqrt{2}$  (табл. 5).

Таблица 5

Средние квадратические погрешности определения ширины колеи железнодорожного пути геодезическим методом

Средние квадратические погрешности измерения горизонтального угла $m_{\beta}$ , с	Длины сторон до определяемых точек $d$ , м								
	20			50			100		
	Средние квадратические погрешности измерения расстояния $m_d$ , мм								
	2	3	5	2	3	5	2	3	5
1	3,47	4,69	7,35	3,48	4,70	7,36	3,53	4,74	7,38
2	3,48	4,70	7,35	3,55	4,75	7,39	3,80	4,94	7,51
5	3,55	4,75	7,39	3,97	5,06	7,59	5,46	6,14	8,29

В соответствии с требованиями инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов [8], геометрические параметры рельсовой колеи должны определяться с точностью 1–3 мм. Отсюда, геодезический метод может применяться для определения ширины колеи на малоскоростных и малодейственных участках железных дорог.

Средняя квадратическая погрешность определения превышений из тригонометрического нивелирования, при определении координат точек методом полярных координат, может быть вычислена по формуле:

$$m_h^2 = \left( m_d \tan v + \frac{m_v d}{\rho'' \cos v} \right)^2 + m_i^2 + m_v^2, \tag{7}$$

где  $m_d$ ,  $m_v$ ,  $m_i$ ,  $m_v$  – средние квадратические погрешности измерения горизонтального проложения  $d$ , угла наклона  $v$ , высоты инструмента  $i$ , высоты наведения  $v$ .

Обозначим:

$$\left( m_d \tan v + \frac{m_v d}{\rho'' \cos v} \right)^2 = m_h'^2. \tag{8}$$

Вычислим по формуле (8) средние квадратические погрешности определения превышений из-за ошибок измерения расстояний и углов наклона (табл. 6).

Таблица 6

Средние квадратические погрешности определения превышений  $m_h'$ , мм

Расстояние $d$ , м	$m_h'$ , мм											
	$v$											
	1°						3°					
	$m_v^2$											
	1"	2"	1"	2"	1"	2"	1"	2"	1"	2"	1"	2"
	Средняя квадратическая погрешность измерения расстояния $m_d$ , мм											
	2		3		5		2		3		5	
20	0,10	0,20	0,11	0,20	0,13	0,21	0,14	0,22	0,18	0,25	0,28	0,33
50	0,24	0,48	0,25	0,49	0,26	0,49	0,26	0,49	0,29	0,51	0,36	0,55
100	0,48	0,97	0,49	0,97	0,49	0,97	0,49	0,97	0,51	0,98	0,55	0,99

Из результатов вычислений в табл. 6 вытекает следующее.

1. Средние квадратические погрешности определения превышений тригонометрическим методом возрастают практически пропорционально расстоянию до наблюдаемой точки.

2. Средние квадратические погрешности измерения расстояний незначительно влияют на погрешность определения превышений.

3. Средние квадратические погрешности измерения вертикальных углов пропорционально влияют на погрешность определения превышений.

Вычислим по формуле (7) среднюю квадратическую погрешность определения превышения методом тригонометрического нивелирования, приняв ошибку измерения высоты прибора  $m_i$  и высоты визирования  $m_v$  равными 1 мм (табл. 7).

Таблица 7

Средние квадратические погрешности определения превышений точек методом тригонометрического нивелирования, вычисленные по формуле (7)

Расстояние $d$ , мм	$v$											
	1°						3°					
	$m_v^2$											
	1"	2"	1"	2"	1"	2"	1"	2"	1"	2"	1"	2"
	Средняя квадратическая погрешность измерения расстояния, $m_d$ , мм											
	2		3		5		2		3		5	
20	1,42	1,43	1,42	1,43	1,42	1,43	1,42	1,43	1,43	1,44	1,44	1,45
50	1,44	1,49	1,44	1,50	1,44	1,50	1,44	1,50	1,44	1,50	1,46	1,52
100	1,49	1,71	1,50	1,71	1,50	1,71	1,50	1,71	1,50	1,72	1,52	1,73

Из результатов вычислений (см. табл. 6, 7) вытекает, что на погрешность определения превышений между точками методом тригонометрического нивелирования существенное влияние оказывают ошибки измерения высоты инструмента и высоты визирования.

Уровень между головками рельсов железнодорожного пути на прямых участках геодезическим методом определяется как разность между отметками головок рельсов. Поэтому величины, полученные в табл. 7, нужно умножить на  $\sqrt{2}$ , получим СКП в диапазоне 2,01–2,45 мм.

Из результатов выполненного анализа следует, что при мониторинге геометрии рельсовой колеи железнодорожного пути геодезическим методом предпочтительно для определения уровня между головками рельсов вместо тригонометрического применять геометрический метод нивелирования.

Для выявления фактической точности определения геометрических параметров рельсовой колеи железнодорожного пути геодезическим методом на экспериментальном

объекте с пунктов геодезической опорной сети и, при возможности, с пунктов рабочей реперной сети [9] с использованием электронного тахеометра Trimble M3 Dr выполнялись измерения для определения ширины колеи между отмеченными на шейках рельсов точками и отметок головок рельсов на отмеченных точках.

Некоторые технические характеристики электронного тахеометра TRIMBLE M3 DR: СКО измерения угла 2"; СКО измерения расстояний по призме 2 мм + 2 мм/км; СКО измерения расстояния в безотражательном режиме 3 мм + 2 мм/км; дальность безотражательного режима – 500 м; дальность измерения на марку – 270 м; Дальность измерения на 1 призму – 3 000 м. Увеличение зрительной трубы 30<sup>x</sup>.

Для точного определения ширины колеи использовали специальные «уголки» (рис. 2), позволяющие установить центр отражателя в створе рабочей грани рельса в отмеченных на рельсах точках для определения ширины

колеи и высот головок рельсов. Результаты измерений записывались в память компьютера электронного тахеометра и автоматически по программе тахеометра вычисляется координаты рабочей грани рельса. По этим координатам из решения обратной геодезической задачи вычисляли ширину колеи между рельсами пути  $K_G$  на отмеченных точках.

Для сравнительной оценки точности определения ширины колеи геодезическим методом, на отмеченных точках на рельсах, ширину колеи измеряли сертифицированным путевым шаблоном ПШ-1520В Кш с записью результатов измерений в специальном журнале в дистанции пути.

Некоторые технические характеристики шаблона ПШ-1520В: измерение ширины колеи от 1 505-до 1 555 мм; измерение относительного возвышения рельсов(уровень) от 0 до 160 мм; измерение бокового износа рельса от 0 до 20 мм; определение дефектов поверхности катания рельсов от 0 до 10 мм; средняя квадратическая погрешность измерений геометрических параметров пути (по паспортным данным)  $\pm 1$  мм.

По разностям  $\Delta K_i = K_{Г_i} - K_{Ш_i}$  вычислялась средняя квадратическая погрешность определения ширины колеи геодезическим методом (графа 6 табл. 8).

Для исследования точности определения отметок головок рельсов методом тригонометрического нивелирования, с помощью путеизмерительной тележки и путевым шаблоном, было выполнено геометрическое нивелирование II класса точности по головкам рельсов на отмеченных на рельсах точках.

Для этого были использованы высокоточный нивелир Копi-007 и инварная нивелирная рейка РН-05.

Некоторые характеристики нивелира Копi-007: средняя погрешность измерения  $\pm 0,5$  мм (с применением микрометра) и  $\pm 2,0$  мм (без применения микрометра) на 1 км двойного хода; увеличение зрительной трубы 31,5 $\times$ ; наименьшее расстояние визирования 2,2 м; диаметр входного зрачка 40 мм; коэффициент нитяного дальномера 100; цена деления лимба 10'; цена деления круглого уровня 8'/2 мм; диапазон работы компенсатора  $\pm 10'$ .

Рейка нивелирная РН-05 односторонняя, штриховая с инварной полосой применяется для измерения превышений с точностью 0,5 мм на 1 км хода.

Нивелирование производилось в прямом и обратном направлениях. Наблюдения на станциях выполняли способом «совмещения».

Перед нивелированием выполнили поверку и провели сертификацию нивелира и нивелирных реек на соответствие требованиям инструкции [20].

Ошибки метровых интервалов шкал и всей шкалы инварной рейки не превышали 0,20 мм.

При нивелировании максимальная длина луча визирования не превышала 50 м. Высота луча визирования над подстилающей поверхностью не превышала 0,5 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек не превышало 1,0 м, а накопление этих неравенств не превышало 2,0 м.

На каждой станции подсчитывали значения превышений по наблюдениям основных и дополнительных шкал реек. Расхождения между превышениями и разность высот нулей реек, вычисленные и полученные из исследований, не превышали 0,7 мм. При большем расхождении наблюдения на станциях передельвали, предварительно изменив положения нивелира по высоте не менее чем на 5 см.

Расхождения между превышениями в секциях в прямом и обратном направлениях не превышали 5 мм  $\sqrt{L}$ , где  $L$  – длина нивелирного хода в километрах.

После выполнения нивелирования между исходными реперами было выполнено уравнение превышений и вычисление высот головок рельсов и превышений между ними на прямых участках пути и возвышений наружной нити относительно внутренней на кривом участке.

Затем вычислили разности между превышениями, определенными методом тригонометрического нивелирования и путевым шаблоном с соответствующими превышениями, полученными из геометрического нивелирования:

$$\Delta h_{Г_i} = h_{Г_i} - h_{Ш_i},$$



$$\Delta h_{\text{Ш}_i} = h_{\text{Ш}_i} - h_{\text{T}_i}.$$

где  $h_{\text{T}_i}$ ,  $h_{\text{Ш}_i}$ ,  $h_{\text{T}_i}$  – превышения между головками рельсов, полученные с тригонометрического нивелирования, путевым шаблоном и геометрическим нивелированием соответственно;  $\Delta h_{\text{T}_i}$  – разность между превышениями, полученными из тригонометрического нивелирования и геометрическим нивелированием;  $\Delta h_{\text{Ш}_i}$  – разность между превышениями, полученными путевым шаблоном и геометрическим нивелированием.

По полученным разностям вычислялись средние квадратические погрешности определения превышений между головками рельсов методами тригонометрического нивелирования и путевого шаблона.

Для исследования точности определения геометрии рельсовой колеи железнодорожного пути путеизмерительной тележкой использовался автоматизированный путеизмерительный комплекс Gedo (рис. 2).



Рис. 2. Путеизмерительная система Gedo

Gedo – это универсальная передвижная платформа, которая позволяет определять геодезические координаты рельсовой колеи, геометрические параметры рельсовой колеи в стандарте ЦП515, характеристики кривой в стандарте ФП5, получать в полном объеме

данные для составления продольного профиля, выполнять линейную и координатную привязку железнодорожных объектов и элементов пути, производить геодезическую съемку придорожной инфраструктуры.

С помощью программных продуктов GEDO (GEDO Vorsys, GEDO Track, GEDO Rec) выполняются расчеты всех геометрических параметров рельсовой колеи и элементов пути, определяются отклонения от действующих нормативов, а также формируется задание для автоматизированной выправочной машины.

Программное обеспечение GEDO Office позволяет провести анализ полученных данных, обработку этих данных, сделать сравнение с данными, полученными ранее на этом объекте, проектными данными строительства или ремонта пути.

Некоторые технические характеристики Gedo:

- допускаемая абсолютная погрешность при выполнении замеров межрельсового расстояния  $\pm 0,3$  мм;
- допускаемая абсолютная погрешность измерений возвышения наружного рельса в кривых  $\pm 0,5$  мм;
- вес платформы без датчиков и тахеометров 17 кг.

Позиционирование тележки в процессе выполнения работ может осуществляться двумя способами:

- с помощью геодезического ГНСС оборудования;
- с помощью роботизированного электронного тахеометра.

Имеется два режима работы системы: «онлайн» и «оффлайн».

В режиме «онлайн» результаты измерений непосредственно передаются в подключенный ноутбук, в котором сразу производятся расчет и отображение измеряемых параметров рельсовой колеи.

В режиме «оффлайн» все измеренные данные отображаются, накапливаются и хранятся в бортовом программном обеспечении RailSURV, которое устанавливается в роботизированный тахеометр или в полевой контроллер при использовании ГНСС-оборудования. Программа RailSURV синхронизирует

по времени результаты геодезических определений и данные путеизмерительного комплекса Gedo.

Путеизмерительная система Gedo состоит из двух идентичных тележек.

В раме системы расположены измерители ширины колеи, превышения между рельсами и величины перемещения по рельсам, а также аккумуляторная батарея и радиомодем. Уровень измеряется инклинометром. Величины перемещения по рельсам измеряет одометр по числу оборотов одного из колес систем. Отклонения ширины колеи от заданного значения измеряется контактным датчиком, измерительный щуп которого касается рельса.

Система допускает возможность установки на установочную площадку системы тахеометра, ГНСС-приемника, держателя с призмой или лазерного сканера. Система совместима с тахеометрами Trimble серии S, имеющими функцию автоматического слежения за отражателем, ГНСС-приемниками Trimble серии R, с 3D-сканерами, устройством для замера профиля железнодорожного пути контроллером Trimble TSC3.

Для определения геометрических параметров рельсовой колеи с использованием системы Gedo экспериментальный объект разбивался на участки так, чтобы при установке тележек на конечные точки участка между ними была хорошая видимость.

На начальной точке отрезка участка устанавливали тележку с отражателем от роботизированного тахеометра Trimble S71", а на ко-

нечной точке отрезка тележку с тахеометром ST1".

Используя координаты реперов специальной реперной сети, определяли координаты электронного тахеометра, расположенного на тележке. Затем производилось ориентирование тахеометра на репер с известными координатами. Далее тахеометр наводился на отражатель, установленный на задней тележке.

После этого тележка с отражателем передвигается по железнодорожному пути в направлении передней тележки, останавливаясь на каждой десятой шкале, окрашенной белой краской, на 5–7 с для фиксации пространственных координат положения отражателя в контролере. В такой последовательности производили измерения на данном отрезке участка.

Затем тележка с электронным тахеометром перемещается на конец следующего участка, и измерения повторяются.

Результаты измерений сохраняются в памяти контроллера.

Результаты измерений могут быть экспортированы из контроллера в программу RailVW для их дальнейшей обработки на компьютере.

Сравнительные результаты определения геометрических параметров рельсовой колеи железнодорожных путей на экспериментальном участке методами геодезических измерений, путевого шаблона и автоматизированной путеизмерительной системой GEDO приведены в табл. 8.

Таблица 8

Средние квадратические погрешности определения, геометрии рельсовой колеи железнодорожного пути, мм

Методы и средства определения геометрии пути	Методы и средства определения геометрии пути							
	Геодезический		Геометрическое нивелирование		Путевой шаблон		GEDO	
	Показатели геометрии пути							
	ширина колеи	уровень	ширина колеи	уровень	ширина колеи	уровень	ширина колеи	уровень
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Геодезический	-	-	-	2,41	2,96	2,36	3,21	2,52
Геометрическое нивелирование	-	2,41	-	-	-	1,04	-	0,44
Путевой шаблон	2,96	2,36	-	1,05	-	-	0,43	0,89
АПК GEDO	3,21	2,52	-	0,44	0,43	0,95	-	-

### Заключение

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Gedo обеспечивает необходимую точность [2, 5, 8].

2. Gedo позволяет определять геометрические параметры пути в единой системе координат, которая повышает достоверность и точность определения геометрических параметров пути, а также моделировать происходящие изменения на путях во времени.

3. Gedo позволяет в режиме реального времени или после обработки результатов из-

мерений по программе GEDO Office выявлять длинные неровности, перекосы, просадки и боковой износ рельсов.

4. Gedo обеспечивает получение всех характеристик кривых в плане и продольном профиле.

5. Программное обеспечение Gedo позволяет в процессе измерений сразу их обработать, получить данные (рихтовки) для постановки пути в проектное положение и передать их автоматизированной путевыправочной системе.

6. Общим недостатком определения геометрии рельсовой колеи с использованием подобного рода Gedo систем является измерения незагруженного пути.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога». Утверждена ОАО «РЖД» 05.12.2017 № 1285. – М. : Кодекс, 2017. – 92 с.

2. Инструкция по текущему содержанию пути и правила по технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (ПТЭ), утвержденные приказом Минтранса России № 286 от 21.12.2010 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути [Электронный ресурс] : распоряжение ОАО «РЖД» от 29.12.2012 № 2791р. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

5. Положение о порядке контроля состояния главных и станционных путей путеизмерительными средствами, утвержденное распоряжением ОАО «РЖД» от 07.04.2017 № 678р [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

6. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Минтрансом России 21.12.2010 № 286 р., актуализированы 01.02.2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1827&ysclid=l8ok19zj5w951252927> (дата обращения 28.01.2022).

7. ФТС ЖД ЦП 096–2002 «Путеизмерительные средства контроля и оценки параметров состояния и устройства железнодорожного пути (вагоны-путеизмерители)». Требования по сертификации. Указание МПС России от 22.03.2002 № М-244у [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [mintrans.gov.ru/file/396269](http://mintrans.gov.ru/file/396269) (дата обращения 18.01.2022 г.).

8. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов. Утверждена ОАО «РЖД». Распоряжение от 28.02.2020 № 436/р [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

9. Специальная реперная система контроля состояния железнодорожного пути в профиле и плане. Технические требования. Утверждены МПС РФ 26.03.1998 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс».

10. Щербаков В. В., Жидов В. М., Макушинская М. В. Специальная реперная железнодорожная система // Геодезия и картография. – 2010. – № 12. – С. 12–16.

11. Жидов В. М. Геодезическая съемка железнодорожных путей с использованием АПК «Профиль» // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 1, ч. 2. – С. 121–122.

12. Щербаков В. В., Ковалева О. В., Щербаков И. В. Цифровые модели пути – основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 12–16.

13. Щербаков И. В. Аппаратно-программный комплекс «Профиль-М» для определения пространственных и геометрических параметров рельсовой колеи // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Вып. 3 (22). – С. 45–60.
14. Щербаков В. В. Автоматизация геодезического обеспечения строительства и ремонта железных и автомобильных дорог: современное состояние и перспективы развития // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск: СГУГиТ. Т. 1. – С. 42–46.
15. Щербаков В. В. Геодезические методы определения геометрических параметров рельсовой колеи // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск: СГУГиТ. Т. 1. – С. 17–23.
16. Ковалева О. В. Измерительные автоматизированные средства проектирования ремонта железнодорожного пути // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири : сб. науч. тр. – Новосибирск : СГУПС, 2006. – С. 130–134.
17. Ковалева О. В. Применение АПК «Профиль» для натурных проверок продольных профилей железнодорожных путей // Вестник СГУПС. – 2006. – Вып. 14. – С. 218–222.
18. Ковалева О. В. Приложение «Профиль-2» как средство создания продольных профилей железных дорог по данным АПК «Профиль» // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири : сб. науч. тр. – Новосибирск : СГУПС, 2006. – С. 127–130.
19. СП 233.132.6000.2015. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Высокоточная координатная Утвержден приказом Минтранса России № 191 от 17.06.2015 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
20. ГКИНП 03-010-03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. Дата актуализации: 01.02.2020 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ. правовой системы «КонсультантПлюс».

#### Об авторах

*Филиз Хайдарович Ниязгулов* – преподаватель кафедры геодезии, геоинформатики и навигации.  
*Андрей Владиславович Кривоус* – аспирант кафедры геодезии, геоинформатики и навигации.

Получено 03.02.2022

© Ф. Х. Ниязгулов, А. В. Кривоус, 2022

### Investigation of the determination accuracy of the railway track spatial position by the Gedo track measuring trolley

*F. Kh. Niyazgulov<sup>1</sup>\*, A. V. Krivous<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Russian University of Transport (RUT (МИИТ), Moscow, Russian Federation

\* e-mail: filyuz1989@yandex.ru

**Abstract.** The implementation of the concept of integrated development of the scientific and technical project "Digital Railway" provides for the development of digital technologies in all areas of activity of JSC "Russian Railways", including the track economy. In order to monitor the current state of the tracks, digital models of the tracks are created and maintained at the level of modern requirements, used to collect, store and evaluate spatial data on the current state of the tracks and develop recommendations for the prevention and elimination of identified malfunctions. The most effective and universal means of controlling and straightening the track is the coordinate method based on a system of continuous coordinate-digital description of the track in a single coordinate system. Track measuring wagons widely used in the railway network do not allow obtaining the geo-metric parameters of the track in a single coordinate system. Because of this, in our country and in foreign countries, various track-measuring systems have been developed and are used, allowing to obtain the CMR in coordinates. Therefore, the purpose of theoretical and experimental research is to identify the accuracy of determining the geometric parameters of the railway track using the Gedo track measuring trolley. The method of determining the track geometry, technical characteristics and distinctive features of the Gedo track measur-

ing trolley are considered. A program of experimental studies is described and comparative accuracy estimates of the railway track geometry determination by the geodetic method, using a Gedo track measuring trolley and a rail gauge template are given. It is shown that in connection with the transition of the railway industry to digital technologies for modeling infrastructure facilities, it is most expedient to use the Gedo track measuring trolley for monitoring the geometry of the railway track, which provide the required accuracy of determining the geometry of the track, productivity and obtaining the necessary information in a single coordinate system.

**Keywords:** monitoring; geodesy; geometry of the railway track; accuracy; electronic total station; track measuring trolley; level; rail gauge template; average square error

## REFERENCES

1. The concept of the implementation of the integrated scientific and technical project "Digital Railway". (2017). Approved by JSC "Russian Railways" of December 05, 2017 No. 1285. Moscow: Kodeks Publ., 92 p. [in Russian].
2. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 286 of December 21, 2010. Instructions for the current maintenance of the track and rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation (PTE). Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
3. Order of JSC "Russian Railways" of December 29, 2012 No. 2791r. Instructions on the current maintenance of the railway track. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
4. Order of JSC "Russian Railways" of November 14, 2016 No. 2288r. Instruction on the current maintenance of the railway track. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
5. Order of JSC "Russian Railways" of April 7, 2017 No. 678r. The Regulation on the procedure for monitoring the condition of the main and station tracks by measuring means. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
6. Ministry of Transport of the Russian Federation of December 21, 2010 No. 286R updated on February 01, 2020. Rules of technical operation of railways of the Russian Federation. Retrieved from <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1827&ysclid=18ok19zj5w951252927> (accessed January 28, 2022) [in Russian].
7. Instruction of the Ministry of Internal Affairs of Russia No. M-244u of March 22, 2002. FCS railway CP 096-2002 "Track measuring tools for monitoring and evaluating the parameters of the condition and device of the railway track (track measuring cars)". Certification requirements. Retrieved from [mintrans.gov.ru "file/396269"](http://mintrans.gov.ru/file/396269) (accessed January 28, 2022) [in Russian].
8. Order of JSC "Russian Railways" of February 02, 2020 No. 436/r. Instructions for assessing the condition of the track gauge by track measuring means and measures to ensure the safety of train traffic. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
9. Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation on March 26, 1998. A special reference system for monitoring the condition of the railway track in the profile and plan. Technical requirements. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
10. Shcherbakov, V. V., Zhidkov, V. M., & Makushinskaya, M. V. (2010). Special reference railway system. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 12, 12–16 [in Russian].
11. Zhidov, V. M. Geodesic survey of railway tracks using agro-industrial complex "Profile". In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2006 [Proceedings of GEO-Siberia-2006]* (pp. 121–122). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
12. Shcherbakov, V. V., Kovaleva, O. V., & Shcherbakov, I. V. (2016). Digital models of the path – the basis of geodetic support for the design, construction (repair) and operation of the same roads. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 3, 12–16 [in Russian].
13. Shcherbakov, I. V. (2017). Hardware and software complex "Profile-M" for determining the spatial and geometric parameters of the rail track. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 45–60 [in Russian].
14. Shcherbakov, V. V. (2017). Automation of geodetic support for the construction and repair of railways and highways: current state and prospects of development. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir': Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziia, geoinformatika, kartografiia, marksheideriia [Proceedings of Interekspo GEO-Siberia: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 42–46). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
15. Shcherbakov, V. V. (2017). Geodesic methods for determining geometric parameters of a rail track. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir': Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziia, geoin-*

formatika, kartografiia, marksheideriia [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 17–23). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

16. Kovaleva, O. V. (2006). Measuring automated design tools to repair railway tracks. In *Sbornik nauchnykh trudov: Zheleznye i avtomobil'nye dorogi v usloviakh Sibiri* [Collection of Scientific Works: Railways and Highways in the conditions of Siberia] (pp. 130–134). Novosibirsk: STU Publ. [in Russian].

17. Kovaleva, O. V. (2006). Application of agroindustrial complex "Profile" for full-scale inspections of longitudinal profiles of railway tracks. *Vestnik SGUPS* [Bulletin of the STU], 14, 218–222 [in Russian].

18. Kovaleva, O. V. (2006). Application "Profile-2" as a means of creating longitudinal profiles of railways according to the agro-industrial complex "Profile". In *Sbornik nauchnykh trudov: Zheleznye i avtomobil'nye dorogi v usloviakh Sibiri* [Collection of Scientific Works: Railways and Highways in the conditions of Siberia] (pp. 127–130). Novosibirsk: STU Publ. [in Russian].

19. Order of the Ministry of Transport of Russia of June 17, 2015 No. 191. SP 233.132.6000.2015. Railway transport infrastructure. The high-precision coordinate system was approved by the. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

20. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations. GKINP 03-010-03. Instructions for leveling classes I, II, III and IV. Date of actualization February 01, 2020. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

#### Author details

*Filyuz Kh. Niyazgulov* – Lecturer, Department of Land Geodesy, Geoinformatics and Navigation.

*Andrey V. Krivous* – Ph. D. Student, Department of Land Geodesy, Geoinformatics and Navigation.

Received 03.02.2022

© F. Kh. Niyazgulov, A. V. Krivous, 2022