

Шеховцов Геннадий Анатольевич

д-р техн. наук, профессор кафедры

Раскаткина Ольга Валерьевна

ассистент

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»

г. Нижний Новгород, Нижегородская область

КАЛИБРОВКА ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ ПО ВЕРТИКАЛЬНОМУ БАЗИСУ С ЦЕЛЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

***Аннотация:** в статье приведена методика калибровки цифровой фотокамеры с целью определения расстояний фотографическим способом. Показано решение поставленной задачи и её геометрическая интерпретация. Приведены примеры.*

***Ключевые слова:** цифровая фотокамера, масштабирование, базис калибровка.*

В работе Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова «О применении фотографического способа измерения расстояний», опубликованной на сайте журнала Геопрофи (<http://www.geoprofi.ru/news/staty-shekhovcov-12-11-2015>) описана методика калибровки цифровой фотокамеры по горизонтальному базису b (нивелирной рейке) с целью определения расстояний фотографическим способом.

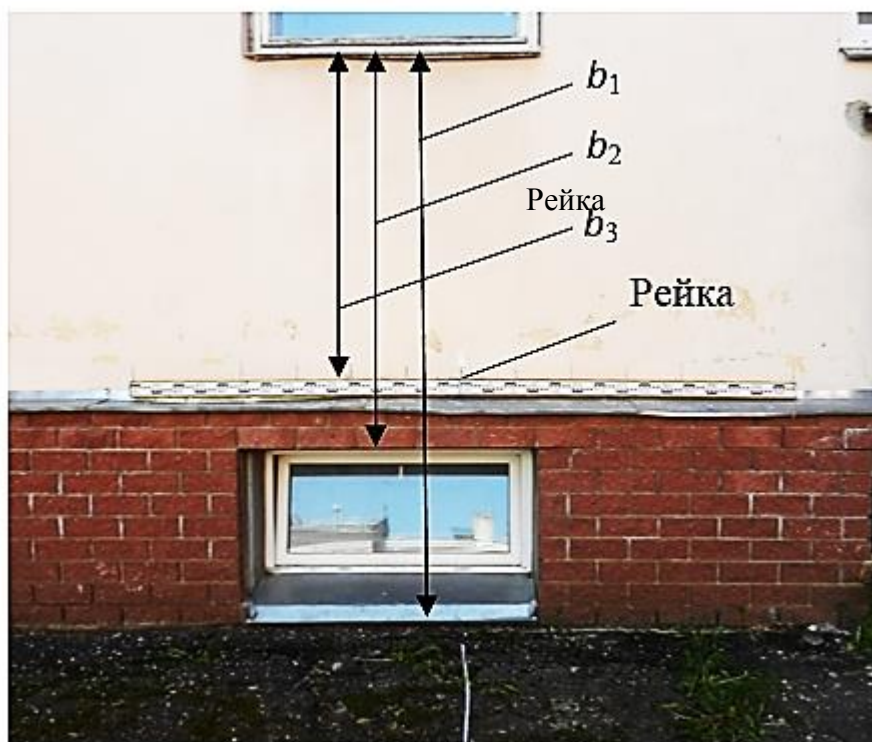


Рис. 1. Нивелирная рейка и расстояния на снимках, принятые в качестве вертикальных базисов

Методика калибровки цифровой камеры *Nikon COOLPIX S9100* заключалась в фотографировании рейки через 1 м в интервале от 3 до 30 м для базисов 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 3,0 м (рис. 1). В результате обработки снимков с помощью Paint путём определения количества пикселей Δ в длине базиса b было установлено, что размер одного пикселя $\delta = b/\Delta$, зависит только от расстояния d и не зависит от величины базисов b . Для всех базисов эта зависимость иллюстрируется графиком на рис. 2 и может быть выражена равенством:

$$\delta_i = \delta_n + \frac{(d_i - d_n)(\delta_k - \delta_n)}{(d_k - d_n)}, \quad (1)$$

где δ_i – размер пикселя на расстоянии d_i ; δ_n – размер пикселя на расстоянии $d_n = 3$ м; δ_k – размер пикселя на расстоянии $d_k = 30$ м.

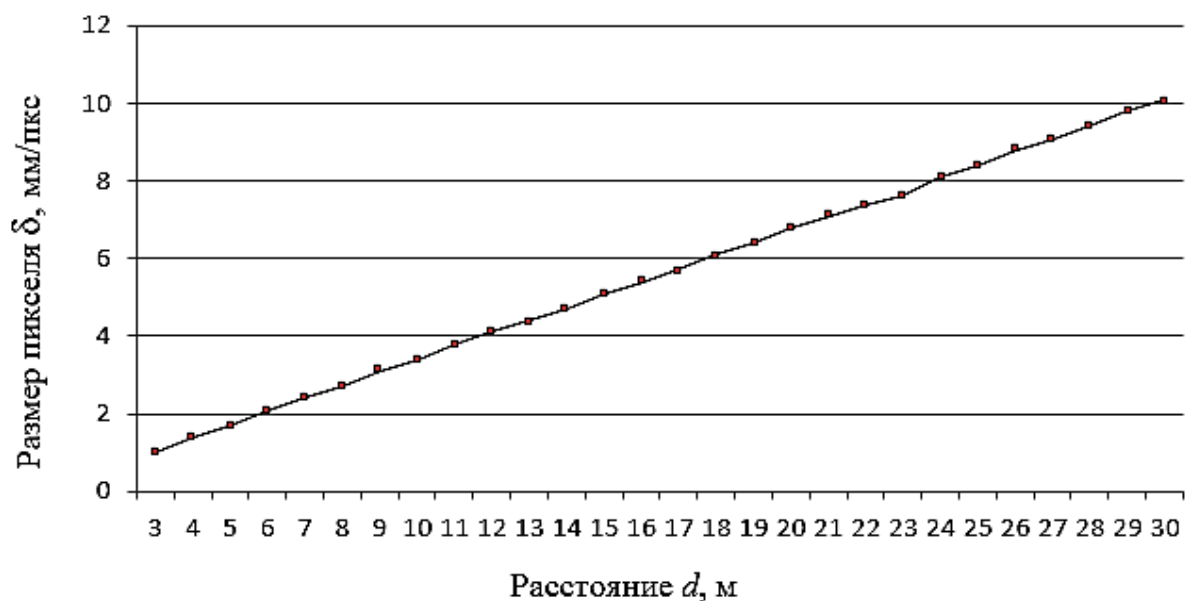


Рис. 2. График зависимости размера пикселя от расстояния до горизонтального базиса

Полученные снимки были использованы для калибровки той же камеры по вертикальному базису. Для этого были измерены в месте расположения рейки расстояния $b_1 = 2,58$ м, $b_2 = 1,87$ м и $b_3 = 1,48$ м, которые в дальнейшем играли роль трёх вертикальных базисов (рис. 1).

Каждую фотографию, соответствующую целому количеству метров начиная с 4 м, выводили на экран монитора и открывали файл с помощью Paint. Курсор подводили к верхним В и нижним Н концам базисов и отсчитывали количество пикселей, соответствующих каждому положению курсора. Таким образом выполнялась калибровка камеры при разных базисах b , равных 2,58, 1,87 и 1,48 м. Находили разности $\Delta = \text{Н-В}$ количества пикселей, соответствующих длине каждого базиса. Результаты измерений и вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты калибровки фотокамеры Nikon COOLPIX S9100

d , м	Верхние В и нижние Н отсчёты, пкс				Разности $\Delta = H - B$, пкс			Размер пикселя δ , мм		
	$B_{1,2,3}$	H_1	H_2	H_3	Δ_1	Δ_2	Δ_3	δ_1	δ_2	δ_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	245	2147	1567	1333	1902	1322	1088	1,4	1,4	1,4
5	425	1960	1495	1305	1535	1070	880	1,7	1,7	1,7
6	545	1832	1444	1285	1287	899	740	2,0	2,1	2,0
7	653	1832	1475	1325	1100	822	672	2,3	2,3	2,2
8	793	1755	1465	1345	962	672	552	2,7	2,8	2,7
9	725	1586	1327	1221	861	602	496	3,0	3,1	3,0
10	829	1603	1371	1273	774	542	444	3,3	3,5	3,3
11	877	1584	1372	1289	707	495	412	3,6	3,8	3,6
12	985	1630	1437	1361	645	452	376	4,0	4,1	3,9
13	1205	1792	1613	1541	587	408	336	4,4	4,6	4,4
14	1203	1754	1587	1581	551	384	378	4,7	4,9	3,9
15	1346	1857	1701	1638	511	355	292	5,0	5,3	5,1
16	1331	1809	1664	1605	478	333	274	5,4	5,6	5,4
17	1358	1807	1670	1614	449	312	256	5,7	6,0	5,8
18	1308	1736	1607	1554	428	299	246	6,0	6,3	6,0
19	1365	1772	1649	1599	407	284	234	6,3	6,6	6,3
20	1276	1661	1545	1498	385	269	222	6,7	7,0	6,7
21	1310	1677	1566	1521	367	256	211	7,0	7,3	7,0
22	1385	1734	1628	1586	349	243	201	7,4	7,7	7,4
23	1326	1658	1558	1517	332	232	191	7,8	8,1	7,7
24	1524	1844	1747	1798	320	223	274	8,1	8,4	5,4
25	1435	1741	1648	1611	306	213	176	8,4	8,8	8,4
26	1341	1636	1548	1512	295	207	171	8,7	9,0	8,7
27	1416	1701	1615	1581	285	199	165	9,1	9,4	9,0
28	1422	1696	1613	1579	274	191	157	9,4	9,8	9,4
29	1200	1467	1386	1354	267	186	154	9,7	10,1	9,6
30	1277	1534	1457	1426	257	180	149	10,0	10,4	9,9

По данным табл. 1 можно определить размер одного пикселя $\delta = b/\Delta$, соответствующий конкретному расстоянию d от фотокамеры до базиса.

Проведенные исследования показали, что (как и в предыдущем случае) размер пикселя зависит только от расстояния d и не зависит от величины базиса b . Эта зависимость может быть выражена равенством (1) и иллюстрируется графиком на рис. 3, который полностью идентичен таковому на рис. 2.

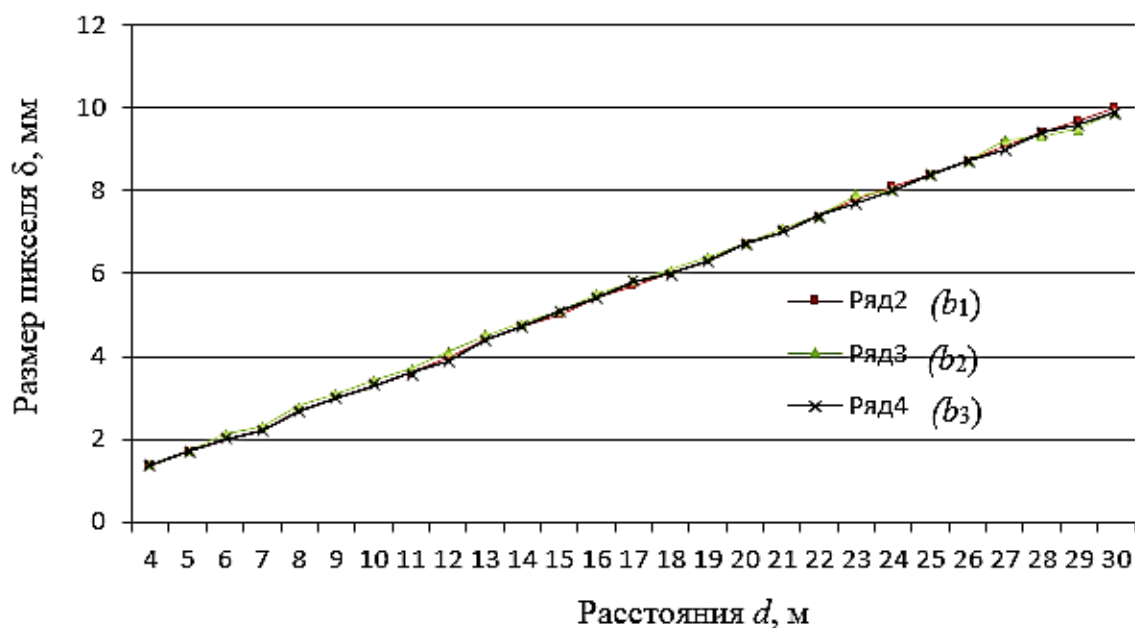


Рис. 2. График зависимости размера пикселя δ от расстояния до базиса d

Поэтому на практике можно ограничиться тщательным определением δ_n и δ_k , а любой размер пикселя δ_i может быть найден по формуле (1). В дальнейшем теоретическая величина δ_i может использоваться, во-первых, для перевода пикселей в метрическую систему единиц и. во-вторых, для контроля правильности определения d_i . Для этого, определив Δ_i и d_i , следует по формуле (1) вычислить фактическую величину δ_f и сравнить с теоретическим её значением, найденным по формуле (1).

На основании данных табл. 1 построены для фотокамеры *Nikon COOLPIX S9100* графики зависимости расстояний d от количества пикселей Δ , приходящихся на базисы длиной b_1 , b_2 , b_3 . Причём эти графики полностью идентичны таковым, построенным по горизонтальному базису. По таким графикам, вычерченным в крупном масштабе, можно определять графически расстояния d' в зависимости от количества пикселей Δ' для применяемого базиса определённой длины (рис. 3).

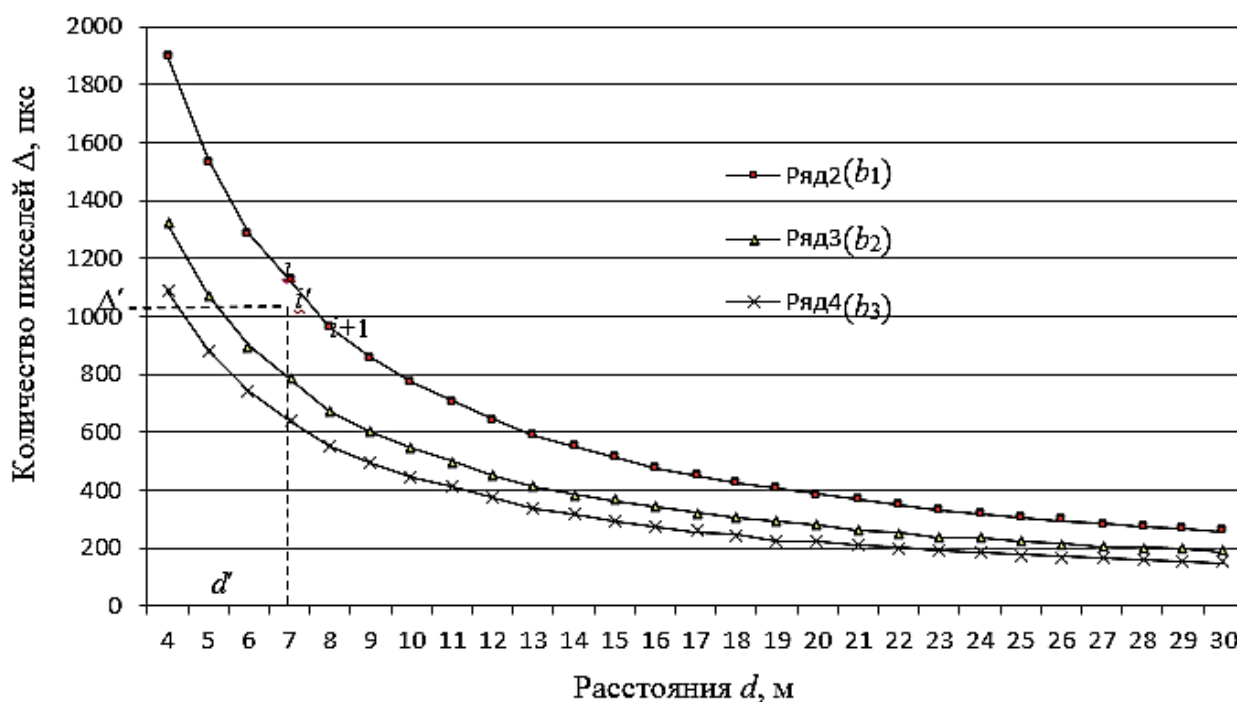


Рис. 3. Графики зависимости расстояния d от количества пикселей для базисов длиной b_1, b_2, b_3

Следует отметить, что в данной постановке процесс калибровки камеры имеет целью исключение влияния дисторсии объектива, поскольку, во-первых, изображение базиса должно всегда занимать на снимке центральное положение, а размер пикселя, определённый по изображению базиса, не применяется для других частей снимка. Действительно, если точки i и $i+1$ (рис. 3) дают правильные расстояния d_i и d_{i+1} независимо от наличия или отсутствия дисторсии объектива, то и промежуточная точка i' также зафиксирует правильное расстояние d' . Поэтому для предлагаемой методики калибровки не требуется использование специальных цифровых фотограмметрических систем типа *ERDAS*, *ENVI*, *PHOTOMOD Lite*.

Аналитический путь определения расстояния d' заключается в том, что по измеренному значению Δ' , соответствующему этому расстоянию, определяют однометровый интервал ($d_i - d_{i+1}$), внутри которого располагается Δ' (табл. 1).

Искомое расстояние находят путём интерполяции между крайними значениями Δ_i и Δ_{i+1} этого интервала (рис. 4).

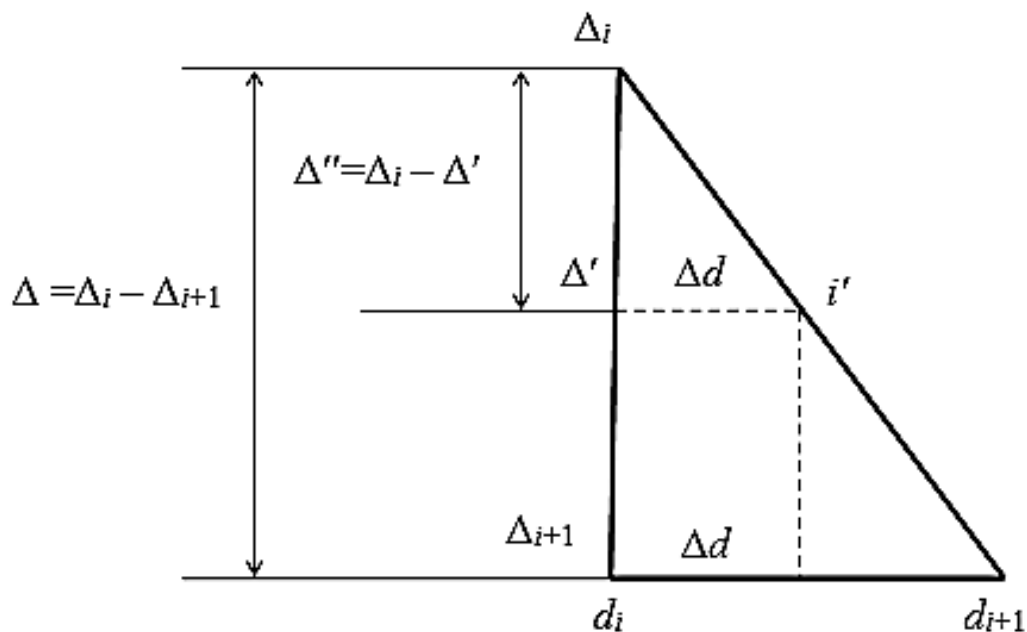


Рис. 4. Вычисление расстояния методом интерполяции

Согласно рис. 4, помня, что интервал $(d_i - d_{i+1}) = 1$ м, расстояние d' можно найти по формуле

$$d' = d_i + \frac{1 \times \Delta'}{\Delta}. \quad (2)$$

Другой путь определения расстояния до объекта съёмки по его фотографии предусматривает выбор аналитической зависимости расстояния d от количества пикселей Δ . Для этого были использованы данные, представленные в табл. 1. Выбор такой аналитической зависимости был осуществлён с использованием метода наименьших квадратов, причём в качестве базовой функции была выбрана функция вида:

$$d = \frac{A}{\Delta}. \quad (3)$$

Для нахождения коэффициента A на основе метода наименьших квадратов можно получить следующее соотношение:

$$A = \frac{\sum_{i=3}^n d_i / \Delta_i}{\sum_{i=3}^n 1 / \Delta_i^2}, \quad n = 27 \quad (4)$$

Подставляя в соотношение (4) данные из табл.1 последовательно для каждого базиса, получим для коэффициента A следующие величины: $A_1= 7691,6$ для базиса b_1 ; $A_2= 5367,9$ для базиса b_2 ; $A_3=4506,3$ для базиса b_3 . Размерность коэффициента A м×пкс.

Для контроля правильности выбора аналитического выражения (4) была выполнена проверка точности определения расстояний d от величин Δ в диапазоне расстояний от 4 м до 30 м. Для этого с помощью формулы (3) при найденных коэффициентах A были вычислены значения величин d_i в точках Δ_i , заданных в таблице 1 и сравнены с соответствующими табличными значениями. По их разности были найдены относительные ошибки вычисленных значений d_i по отношению к табличным d и построены графики (рис. 5).

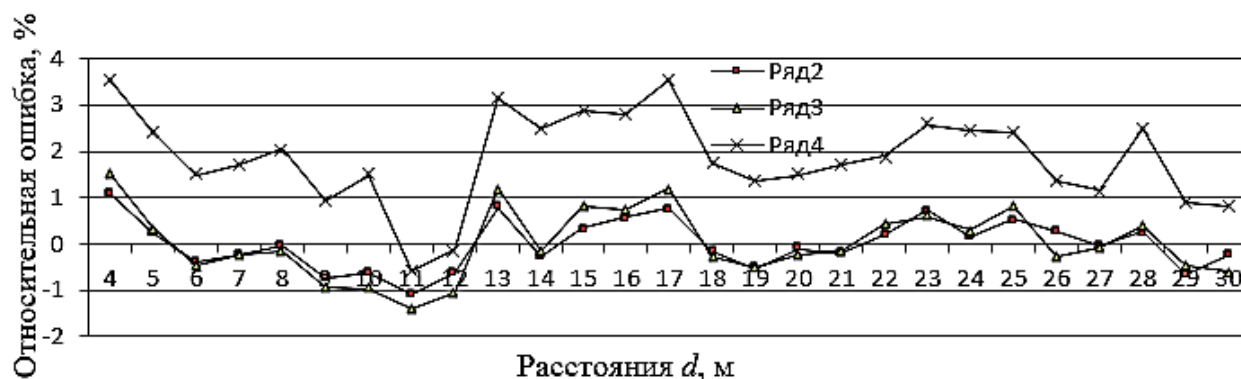


Рис. 5. Графики зависимости ошибки вычисления величин d по формуле (3) для базисов длиной b_1 , b_2 , b_3

Как следует из рис. 5, относительные ошибки вычисленных по формуле (3) величин d_i для базисов b_1 и b_2 (ряд 2 и 3) в диапазоне от 4 до 30 м находятся в пределах от +1,5 до – 1,4%, а для базиса b_3 (ряд 4) соответственно от + 3,5 до - 0,6%. В среднем относительные ошибки для базисов b_1 и b_2 составили 0,003% и 0,012%, в то время как для базиса b_3 она оказалась равной 1,860%.

Для повышения точности определения расстояний предлагается методика введения в результаты измерений Δ соответствующих поправок. Для этого по формуле (3) находим:

$$\Delta_0 = A/d, \quad (5)$$

где Δ_0 – количество пикселей, соответствующих расстояниям 4, 5, ..., 29, 30 м (графы 5, 6, 7 табл. 2).

Таблица 2

Поправки в измеренные значения Δ (камера Nikon COOLPIX S9100)

$d, \text{ м}$	Количество пикселей в ба- зисах b_1, b_2, b_3			$\Delta_0 = A/d, \text{ пкс}$			$p = \Delta_0 - \Delta, \text{ пкс}$		
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	A_1/d	A_2/d	A_3/d	p_1	p_2	p_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	1902	1322	1088	1922,9	1342,0	1126,6	20,9	20,0	38,6
5	1535	1070	880	1538,3	1073,6	901,3	3,3	3,6	21,3
6	1287	899	740	1281,9	894,7	751,1	– 5,1	– 4,3	11,1
7	1100	822	672	1098,8	816,8	662,8	– 1,2	– 5,2	9,2
8	962	672	552	961,5	671,0	563,3	– 0,5	– 1,0	11,3
9	861	602	496	854,6	596,4	500,7	– 6,4	– 5,6	4,7
10	774	542	444	769,2	536,8	450,6	– 4,8	– 7,2	6,6
11	707	495	412	699,2	488,0	409,7	– 7,8	– 11,0	– 2,3
12	645	452	376	641,0	447,3	375,5	– 4,0	– 4,7	– 0,5
13	587	408	336	591,7	412,9	346,6	4,7	0,9	10,6
14	551	384	378	549,4	383,4	321,9	– 1,6	– 2,6	3,9
15	511	355	292	512,8	357,9	300,4	1,8	– 7,1	8,4
16	478	333	274	480,7	335,5	281,6	2,7	– 7,5	7,6
17	449	312	256	452,4	315,8	265,1	3,4	– 5,2	9,1
18	428	299	246	427,3	298,2	250,4	– 0,7	– 7,8	4,4
19	407	284	234	404,8	282,5	237,2	– 2,2	– 10,5	3,2
20	385	269	222	384,6	268,4	225,3	– 0,4	– 10,6	3,3
21	367	256	211	366,3	255,6	214,6	– 0,7	– 7,4	3,6
22	349	243	201	349,6	244,0	204,8	0,6	– 9,0	3,8
23	332	232	191	334,4	233,4	195,9	2,4	– 3,6	4,9
24	320	223	274	320,5	223,7	187,8	0,5	– 9,3	3,8
25	306	213	176	307,7	214,7	180,3	1,7	– 8,3	4,3
26	295	207	171	295,8	206,5	173,3	0,8	– 7,5	2,3
27	285	199	165	284,9	198,8	166,9	– 0,1	– 4,2	1,9
28	274	191	157	274,7	191,7	160,9	0,7	– 9,3	3,9
29	267	186	154	265,2	185,1	155,4	– 1,8	– 10,9	1,4
30	257	180	149	256,4	178,9	150,2	– 0,6	– 9,1	1,2

Разности $p = \Delta_0 - \Delta$ (графы 8, 9, 10 табл. 2) являются поправками в измеренные значения пикселей Δ (графы 2, 3, 4), характер изменения которых в зависимости от расстояния иллюстрируется на рис. 6. Графики наглядно показывает,

как с увеличением расстояния величина поправки уменьшается и, начиная с некоторого момента (в нашем случае примерно с 15 м), остаётся постоянной и для базиса b_1 практически равной нулю.

Аналогичным образом могут быть построены графики, показывающие зависимость величины поправки p от количества измеренных пикселей Δ . По таким графикам, вычерченным в крупном масштабе, можно определять графически p' в зависимости от количества пикселей Δ' для базиса определённой длины по схеме на рис. 4 с использованием формулы (2).

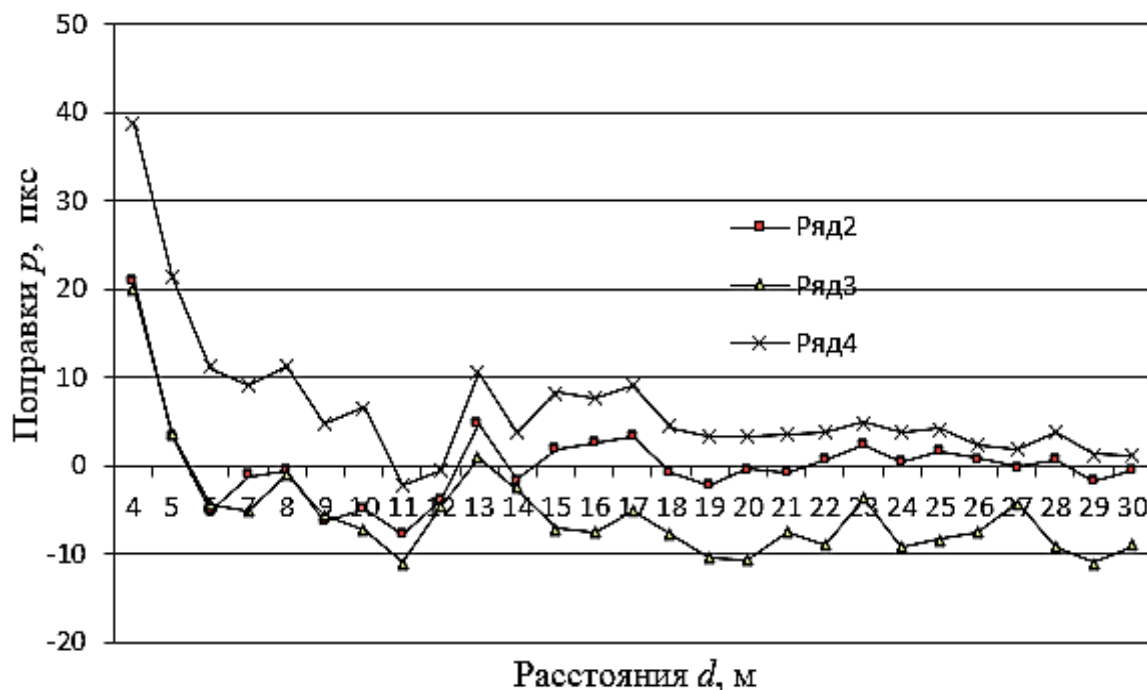


Рис. 6. График зависимости поправок p от расстояния d

В заключение отметим, что знаковое моделирование показало состоятельность предлагаемой методики калибровки цифровой фотокамеры по вертикальному базису с целью определения расстояний фотографическим способом. При этом, для применяемой фотокамеры могут быть получены соответствующие данные как в графической, так и в аналитической форме. Причём установлено, что точность измерений существенно зависит от величины и расположения на снимке изображения базиса, которое должно находиться в центральной части

снимка. Наконец, совместное использование горизонтального и вертикального базисов открывает новые возможности фотографического способа контроля, например, планово-высотного положения подкрановых рельсов и др.

Отдельно следует подчеркнуть простоту и доступность предлагаемого фотографического способа измерения расстояний для исполнителей любой квалификации.