

Рисунок 35 – Круговая кривая и кубическая парабола

Таким образом, в кривых малых радиусов погрешность может достигать 8см.

Практическая проектная проблема здесь возникнет при построении поперечных профилей, расчете габаритов и междупутий в точках пути, лежащих в пикетаже между точками съемки.

Одно из свойств стандартного полиномиального сплайна – связность так же может оказать «медвежью услугу» при моделировании прямых на участке пути. Связность сплайна строго учитывает как предысторию, так и постисторию изменения второй производной (кривизны модели) и приводит к изображенному на рисунке 36 возникновению «гармонических колебаний»

очертания модели, распространяющихся и на прямолинейный участок трассы.

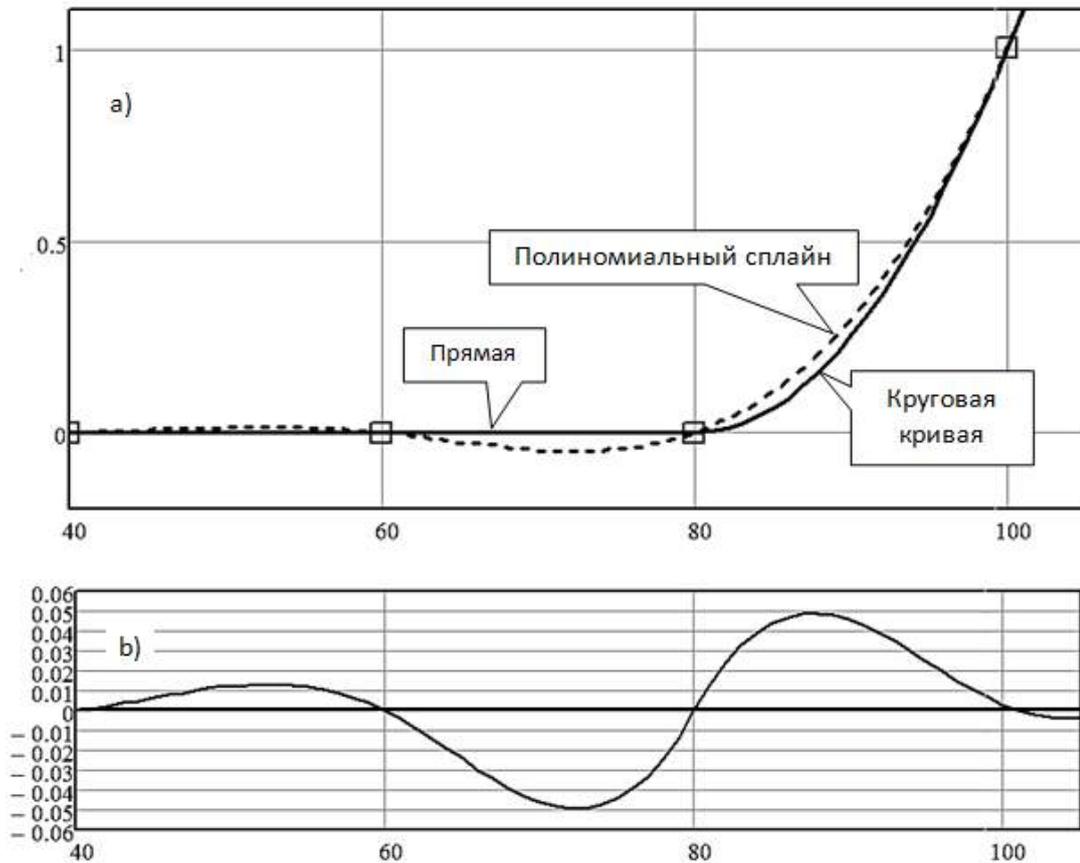


Рисунок 36 – Точная координатная модель плана (а) и отклонения сплайна от этой модели (b)

Несмотря на то, что обычно, между точками съемки конфигурация трассы точно не известна, но тем не менее предсказуема и ожидаема. Результат применения сплайнов в данном случае противоречит этому ожиданию.

Абсолютная гладкость полиномиальных сплайнов (дефекты сплайна равны нулю) является основной проблемой погрешностей моделирования. Резко повысить качество модели можно, отказавшись от гладкости сплайна по второй производной.

От гладкости сплайна по первой производной (тангенс угла наклона касательной) отказаться не представляется возможным в силу специфики моделируемого объекта. Во-первых, положение оси пути определяется по положению рельсовых нитей – упругих стальных полос – чья конфигурация

абсолютно точно не деформируется с образованием точечных углов. Во-вторых, сохранение гладкости сплайна по первой производной упрощает решения смежных задач проектирования – определение междупутий и габаритов.

Формально задача расчёта габарита сводится к определению «кратчайшего расстояния» - отрезка нормали, построенной от оси пути до внешней точки. Рисунок 37 иллюстрирует возможные проблемы, возникающие при отказе от гладкости сплайна по первой производной: в местах стыковки элементов сплайна внешняя точка может оказаться как в области, до которой от оси пути не может быть восстановлена нормаль, так и в области, где нормаль может быть проведена не единственным образом.

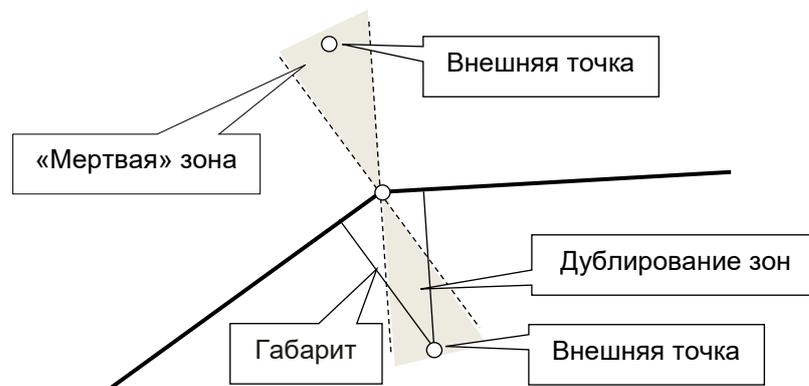


Рисунок 37 – Проблемы расчёта габарита

Для правдоподобной оценки длины трассы между точками съемки нужно сделать предположение о величине угла поворота трассы между ними [30]. Расчётная схема такой модели проиллюстрирована рисунком 38.

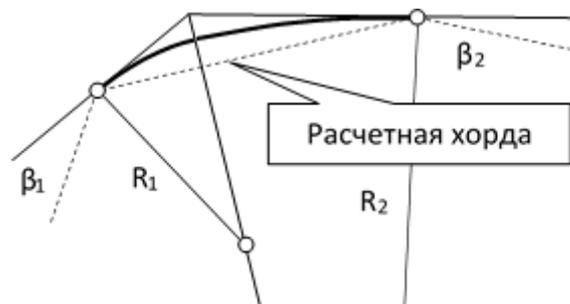


Рисунок 38 – Основная расчётная схема

Радиусы сопрягаемых круговых кривых, описывающих конфигурацию

криволинейного участка трассы:

$$R_1 = S \cdot \frac{1 - \cos \beta_2}{\sin \beta_1 \cdot (1 - \cos \beta_2) + \sin \beta_2 \cdot (1 - \cos \beta_1)}, \quad (8)$$

$$R_2 = S \cdot \frac{1 - \cos \beta_1}{\sin \beta_1 \cdot (1 - \cos \beta_2) + \sin \beta_2 \cdot (1 - \cos \beta_1)}, \quad (9)$$

где S – длина хорды, соединяющей опорные точки.

Длина трассы между опорными точками, следовательно, определяется по формуле (10):

$$d = R_1 \cdot \beta_1 + R_2 \cdot \beta_2 \quad (10)$$

Достоинством этого решения является то, что при равенстве углов β_1 и β_2 равны будут и радиусы кривых R_1 и R_2 , то есть смоделирована именно круговая кривая, чего нельзя сделать при использовании стандартных сплайнов.

Углы β_1 и β_2 отсчитываются от среднего направления сопряженных хорд в начале и конце расчетной хорды.

Здесь нужно выделить частные случаи.

Если разность углов одной из пар сопряженных хорд мала, можно предположить, что в данной точке происходит переход с кривой на прямую (или наоборот). Распространение расчетной схемы, показанной на рисунке 39, и на подобную композицию данных приведет, так же как при использовании полиномиального сплайна, к возникновению «гармонических колебаний» очертания модели, распространенных на прямолинейный участок трассы.

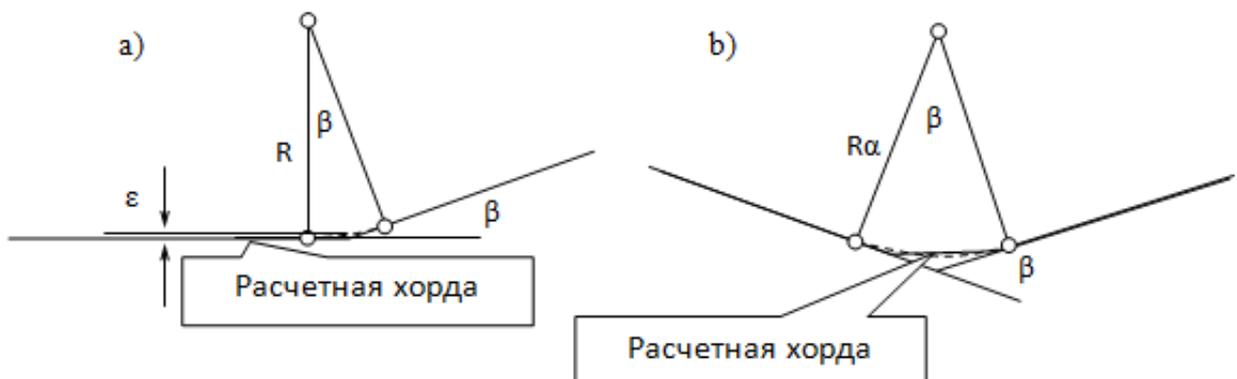


Рисунок 39 - Вставка элемента сплайна типа «круговая кривая» при достаточной (а) и недостаточной (b) длине расчетной хорды

В этом случае за направление для отсчета углов β_1 или β_2 принимается направление соответствующей сопряженной хорды.

Если обе разности углов поворота сопряженных хорд малы, можно предположить, что данный и следующий за ним элементы сплайна описывают прямую. В этом случае в состав сплайна вводится круговая кривая большого радиуса с вершиной угла поворота в точке сопряжения хорд, рисунок 39а. Расчет радиуса производится из условия неперевышения биссектрисой кривой некоторой малой величины ε (например, 0,5 мм). При этом длины тангенсов кривых не должны превышать половины длины соответствующих сопряженных хорд. Если последнее условие не может быть обеспечено, что вполне возможно при использовании данных традиционной съемки, расчетная хорда описывается в составе сплайна как круговая кривая, радиус которой рассчитывается из условия неперевышения отклонений кривой от опорных точек величины ε , рисунок 39 б.

Если разности углов поворота сопряженных хорд имеют разную сторонность, можно предположить, что данный отрезок трассы – локальная «неровность плана пути» [30] S-образного очертания. В этом случае в состав сплайна также вводятся круговая кривая большого радиуса, однако, если длина расчетной хорды недостаточна для размещения тангенса кривой, – она заменяется двумя обратными кривыми, рисунок 40.

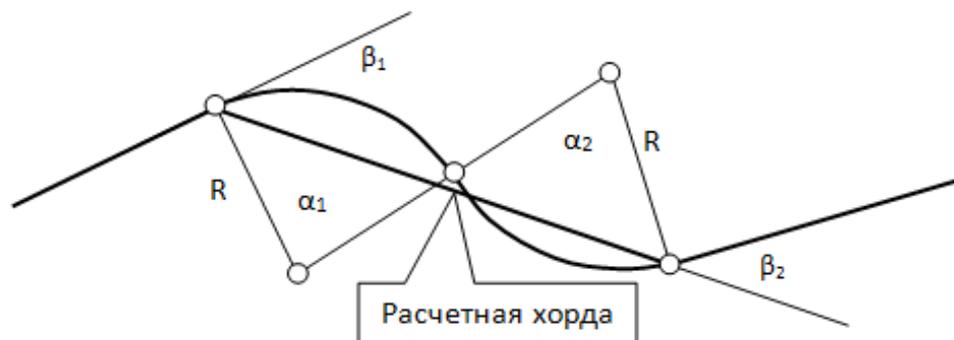


Рисунок 40 - Вставка S-образных элементов сплайна

Если разность углов поворота сопряженных хорд очень мала (близка

к нулю или равна нулю), соответствующая опорная точка удаляется. Признаком малости угла здесь является непревышение отклонения данной опорной точки от прямой, соединяющей смежные опорные точки, величины ε . Эта операция производится в первую очередь – до начала формирования модели.

Перебор пар опорных точек производится последовательно от начала к концу расчетного участка.

Полученная модель трассы состоит только из прямых и круговых кривых. При этом фрагменты модели, потенциально соответствующие фрагментам переходных кривых, заменяются «коробовыми» кривыми [32] – описываются как две сопряженные круговые кривые с уменьшающимся (или увеличивающимся) радиусом.

На рисунке 41 проведен анализ точности моделирования фрагментов переходных кривых (отрезков клотоид) «коробовыми» кривыми. Критическим для точности является моделирование фрагмента короткой переходной кривой при малом радиусе круговой кривой (быстрое изменение кривизны).

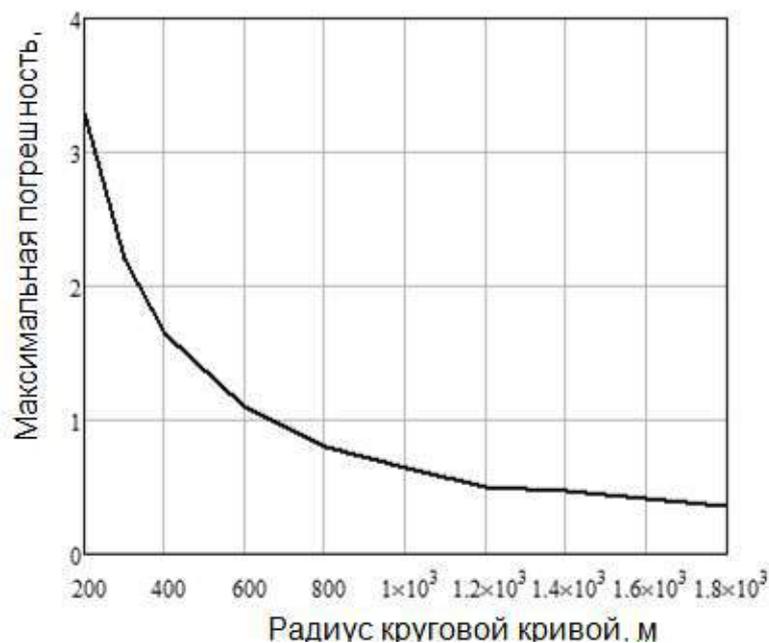


Рисунок 41 - Погрешность моделирования переходных кривых – клотоид «коробовыми кривыми» при шаге точек 10 м ($L = 20$ м)

При шаге опорных точек равном 10 м субмиллиметровая точность достигается для круговой кривой радиуса более 300 м (длина переходной кривой 20 м), что можно считать достаточным. При этом предельная простота и единообразие элементов сплайна обеспечит максимальное быстродействие алгоритма расчета координат при решении различных проектных задач, в том числе, что наиболее существенно, при оптимизации проектных решений.

Для повышения точности моделирования возможны два решения:

1) включить в состав элементов сплайна отрезки клотоид или кубических парабол для описания фрагментов трассы с интенсивным изменением кривизны. Это приведет к усложнению и снижению быстродействия алгоритмов обработки данных (расчету координат трассы существующего пути по модели) – отрезки клотоид и парабола, в отличие от отрезков прямых и круговых кривых, не обладают свойством центральной симметрии, что потребует анализа их направления и его учета при расчете координат по более сложным, чем для прямых и круговых кривых, формулам;

2) произвести искусственное сгущение опорных точек в зонах интенсивного изменения кривизны трассы. При создании модели по данным мобильной лазерной съемки это приведет лишь к небольшому усложнению алгоритма их предобработки. При использовании данных традиционной съемки, в условиях полного отсутствия информации об очертании трассы между съемочными точками, требуется более существенное усложнение алгоритма – элемент сплайна со значительным изменением кривизны сначала моделируется как отрезок клотоиды или кубической параболы, а затем делится пополам с вводом в состав исходных данных фиктивной съемочной точки. Ее координаты равны координатам середины отрезка клотоиды или параболы.

Второе решение предпочтительнее. Предельная простота и единообразие элементов сплайна обеспечит максимальное

быстродействие алгоритма расчета координат при решении различных проектных задач, в том числе, что наиболее существенно, при оптимизации проектных решений.

Таким образом, модель плана трассы железнодорожного пути (переход к пространственной модели см. ниже) формализуется в виде массива данных $M = (S, P)$, где

$S = (s_1, s_2, s_3 \dots s_N)$ – длина элементов сплайна;

$P = (p_1, p_2, p_3 \dots p_N)$ – кривизна элементов сплайна. Для левых кривых кривизна считается положительной, для правых – отрицательной;

$j = 1, 2, 3, \dots N$, где N – число элементов сплайна.

По существу данная модель соответствует графику кривизны с разрывами первого рода.

Для привязки модели к расчетной системе координат должны быть заданы начальные условия: X_0, Y_0, F_0 – начальные координаты и дирекционный угол. Для удобства использования модели при решении проектных задач желательно дополнить ее расчетными данными, а также добавить в конце элемент сплайна нулевой длины (для описания конца участка):

$D = (d_1, d_2, d_3 \dots d_{N+1})$ – расстояние от начала участка;

$d_1 = 0; d_j = \sum_2^j d_{j-1} + s_{j-1}; j = 2, 3, \dots N+1;$

$F = (f_1, f_2, f_3 \dots f_{N+1})$ – угол поворота трассы в начале элемента сплайна;

$f_1 = F_0; f_j = \sum_2^j f_{j-1} + s_{j-1} \cdot p_{j-1}; j = 2, 3, \dots N+1;$

$X = (x_1, x_2, x_3 \dots x_{N+1}), Y = (y_1, y_2, y_3 \dots y_{N+1})$ – геодезические координаты точки

начала элемента сплайна.

$x_1 = X_0; x_j = x_{j-1} + x_e \cdot \cos \alpha_e - y_e \cdot \sin \alpha_e; j = 2, 3, \dots N+1;$

$y_1 = Y_0; y_j = y_{j-1} + x_e \cdot \sin \alpha_e + y_e \cdot \cos \alpha_e; j = 2, 3, \dots N+1;$

где $\alpha_e = s_{j-1} \cdot p_{j-1}$,

если $|p_{j-1}| > 0$, то $x_e = \sin \alpha_e / p_{j-1}$, $y_e = (1 - \cos \alpha_e) / p_{j-1}$, иначе $x_e = s_{j-1}$, $y_e = 0$

С использованием данной модели можно предельно просто и быстро решить все проектные задачи, в которых фигурируют координаты трассы существующего пути.

Длина трассы: $DT = \sum_{j=1}^N s_j$.

Плановые координаты точки трассы (x_t, y_t) , лежащей на оси пути на расстоянии st от начала участка:

$m = 1$, до тех пор пока $st < d_m$, $m = m + 1$;

если $|p_m| = 0$ (прямая), то $x_t = x_m + (st - d_m) \cdot \cos(f_m)$, $y_t = y_m + (st - d_m) \cdot \sin(f_m)$,

иначе (круговая кривая) $x_t = x_m + (\sin \alpha \cdot \cos(f_m) + (1 - \cos \alpha) \cdot \sin(f_m)) / p_m$
 $y_t = y_m + (\sin \alpha \cdot \sin(f_m) - (1 - \cos \alpha) \cdot \cos(f_m)) / p_m$,

где $\alpha = (st - d_m) \cdot p_m$.

Используется вспомогательная система координат.

Методика формирования пространственной модели трассы данного типа реализована в программе **Sterna**. Выполнены тестовые расчеты.

Результат моделирования для одного из расчетных участков, преобразованный в график кривизны, показан на рисунке 42.

Координатные отклонения очертания модели от съемочных точек не превышают 1-2 мм, причем в данном случае можно сказать, что модель более точно, чем данные съемки, отображает положение оси пути в плане – представляет собой по существу «математическое ожидание» данного положения в облаке съемочных точек.

Для перехода от плоской модели к пространственной необходимо дополнение описания элементов сплайна данными о продольном уклоне трассы в его пределах. При этом число элементов сплайна в общем случае увеличится, так как между опорными точками может располагаться перелом профиля.

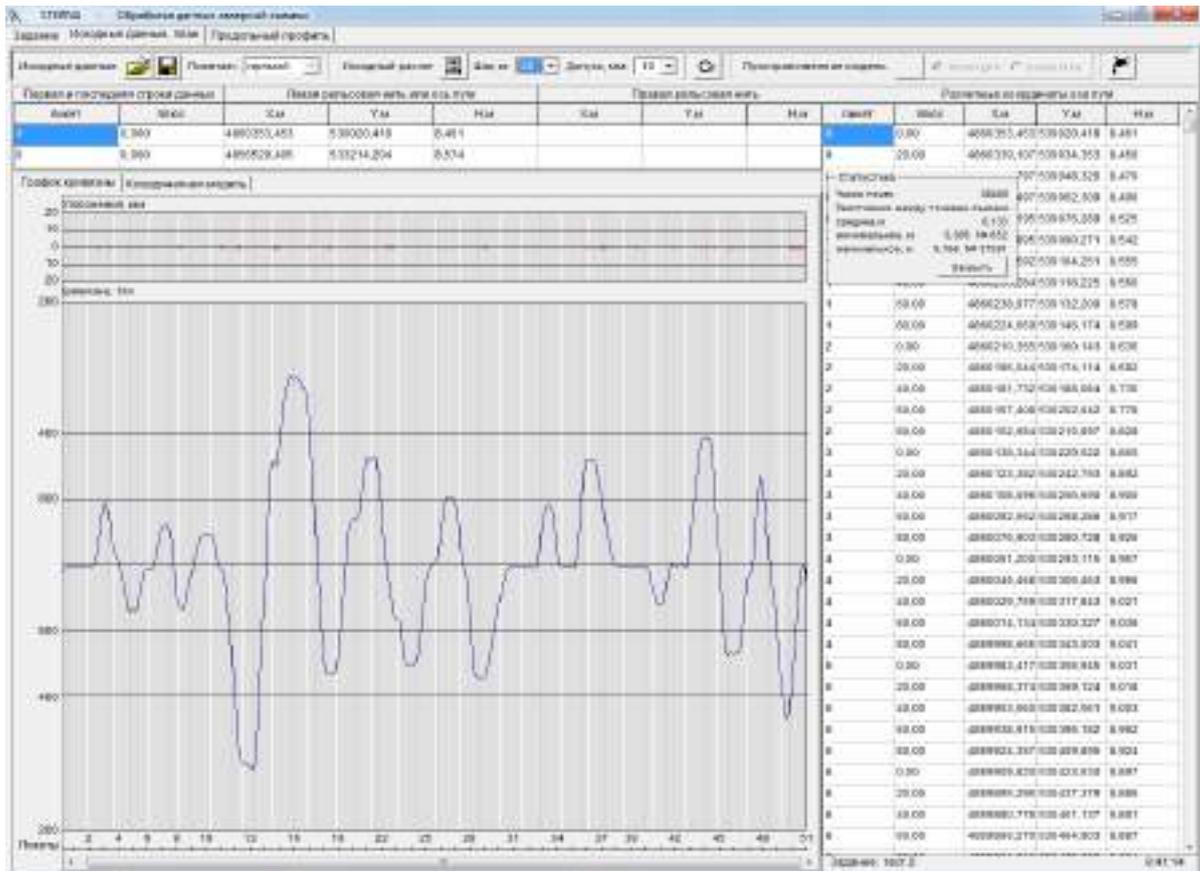


Рисунок 42 - Результаты расчета, длина участка 5.1 км

Для размещения переломов профиля в программе **Sterna** используется алгоритм спрямления с возвратами [33].

В окончательном виде пространственная модель трассы существующего железнодорожного пути имеет вид:

$M = (S, P, I)$, где $S = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_N)$ – длина элементов сплайна;

$P = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_N)$ – кривизна элементов сплайна;

$I = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_N)$ – продольные уклоны элементов сплайна;

$j = 1, 2, 3, \dots, N$;

N – число элементов сплайна.

Кривизна и продольный уклон в пределах каждого элемента сплайна постоянны.

В описанной модели трассы существующего железнодорожного пути возникновение выявленных в ходе исследования погрешностей исключено, ее предполагается использовать при разработке модуля «Параметрическая

модель фактического положения пути» в составе проекта «Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта (КСПД ИЖТ)». Программа **Sterna** рассматривается как прототип (действующая модель) промышленной программы.

2.6 Моделирование профиля существующего пути методом «спрямления с возвратами»

Проектирование реконструкции продольного профиля заключается в максимальном спрямлении его элементов. Спрямление осуществляется в некотором «коридоре» (подъемок и срезок) допустимого проектного положения ломаной линии продольного профиля максимально близко к текущему положению. Данный «коридор» формируется, исходя из регламентируемых нормативами [31] ограничений на траекторию (минимальная длина элементов профиля, уклон и разность уклонов) и ограничений на пространство (высотные ограничения – разность существующего и проектного положений линии продольного профиля). Целеполагающим ограничением спрямления является следующее ограничение на траекторию: длина элемента проектной линии должна быть не меньше существующей. Автоматизация спрямления продольного профиля осуществляется посредством различных алгоритмов [32]. Процесс моделирования продольного профиля существующего пути аналогичен проектированию реконструкции продольного профиля, разница в существенно меньшей величине коридора. Далее по тексту моделируемый профиль будет называться проектным.

Алгоритм последовательной укладки проектной линии продольного профиля состоит из элементарных операций укладки элементов профиля максимальной длины, расположенных в коридоре допустимых отклонений. Конец каждого такого элемента является началом следующего за ним элемента и так до конца расчётного участка. На первый взгляд, результатом работы этого алгоритма является ломаная линия, состоящая из отрезков

наибольшей протяженности, расположенная в установленном коридоре. Но анализ алгоритма показывает, что при определенном наборе ограничений может произойти «потеря управления» и начертание полученной таким образом проектной линии продольного профиля не будет соответствовать цели спрямления (рисунок 43).

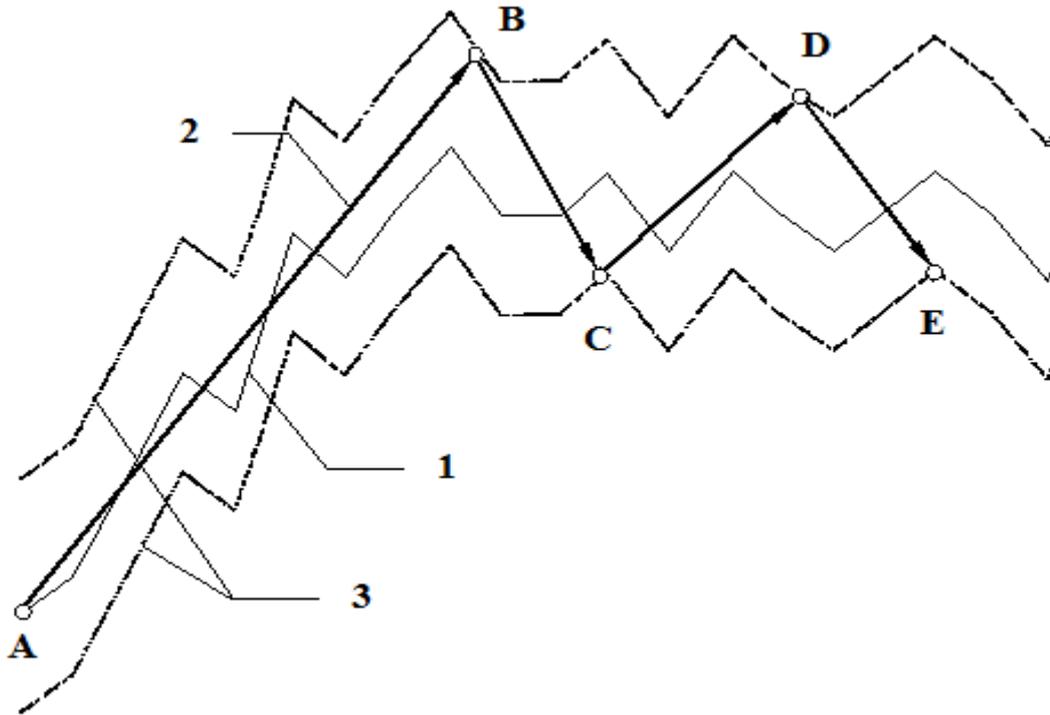


Рисунок 43 - Спрявление профиля: исходная (1) и результирующая (2) ломаные, границы коридора допустимых отклонений (3)

Только уложенный элемент АВ удовлетворяет условиям задачи спрямления, переломы существующего профиля же расположены таким образом, что последовательная укладка следующего элемента ВС по заданному алгоритму приведет к его неизбежному расположению, показанному на рис.35. Элемент достигает границы коридора ранее, чем обеспечивается необходимая протяженность этого элемента, происходит так называемая «челночная» циклическая укладка элементов между границами коридора, что в лучшем случае приведет лишь к неоправданному занижению длин элементов и завышению их количества.

Решением возникающей проблемы [32] при условии сохранения всех очевидных достоинств метода может служить алгоритм, доработанный

операциями оптимизации положения переломов проектной линии продольного профиля (рисунок 44).

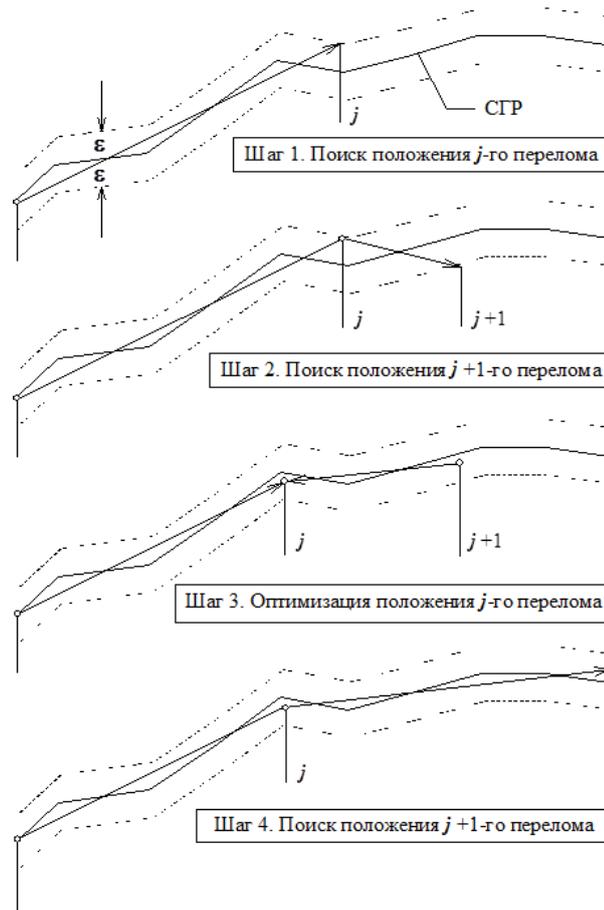


Рисунок 44 - Спрямление продольного профиля с возвратами: ε – допустимое отклонение

Пусть задано существующее положение линии продольного профиля (линии существующих отметок головки рельса - СГР) и определен некоторый коридор $(-\varepsilon; \varepsilon)$ допустимых вертикальных отклонений проектной линии. Тогда доработанный алгоритм будет представлять собой цикл следующих шагов:

1. Производится укладка j -го элемента профиля из условий максимального приближения проектного положения к существующему (например, аппроксимация методом наименьших квадратов), максимизации протяженности и расположения элемента в допустимом коридоре.

2. Начиная с конца j -го элемента, аналогично укладывается следующий $j+1$ -й элемент. Как показывает шаг 2 рисунок 44, данный элемент явно не соответствует конкретной профильной ситуации и его

фиксация таким образом приведёт к ошибочному распознаванию структуры элементов продольного профиля на расчетном участке.

3. Производится оптимизация взаимного расположения j -го и $j+1$ -го элементов за счет смещения границы j -го $j+1$ -го элементов влево.

4. длина $j+1$ -го элемента максимизируется. Следующим шагом является переход к рассмотрению следующей пары элементов, $j+1$ -го и $j+2$ -го.

Сопутствующей операцией алгоритма является контроль за минимальной длиной элемента.

Оптимизация положения элементов проектного продольного профиля при подборе длин элементов и/или пар элементов может осуществляться как аналитически (например, методом наименьших квадратов), так и численно посредством итераций. Первый подход является более быстрым в реализации, а значит, и более предпочтительным.

Цифровая модель продольного профиля существующей линии представляет двумерный массив M :

$$M = (SS, HS), \text{ где}$$

$SS = (ss_1, ss_2, ss_3, \dots, ss_N)$ – расстояние от начала расчетного участка до съемочной точки;

$$HS = (hs_1, hs_2, hs_3, \dots, hs_N) \text{ – отметка существующей головки рельса;}$$

N – число съемочных точек.

Расчетные случаи.

Сначала элемент профиля привязывается к группе точек цифровой модели, лежащих в его пределах:

sp_n и dp – расстояния от начала участка до начала расчетного элемента профиля и его длина;

$$jn = 1, \text{ до тех пор пока } ss_{jn} > sp_n, jn = jn + 1;$$

$$jk = jn, \text{ до тех пор пока } ss_{jk} > sp_n + dp. jk = jk + 1;$$

1 расчетный случай – оптимизация параметров элемента профиля заданной длины (соответствует первому шагу оптимизационного процесса,

цикла, выполняется только для первого элемента профиля).

Задача оптимизации:

$\sum_{j=1}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2 \rightarrow \min$, где hp_1 – начальная проектная отметка, i_1 – уклон элемента профиля.

Метод наименьших квадратов [34] заключается в приравнении нулю частных производных аппроксимируемой функции, в описываемом случае функции $F = \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2$.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial hp_1} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial i_1} = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2 \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j) = 0, \\ 2 \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j) \cdot (ss_j - sp_1) = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=jn}^{jk} hp_1 + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) - \sum_{j=jn}^{jk} hs_j = 0, \\ hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} JK \cdot hp_1 + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j, \\ hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1); \end{cases}$$

$$\begin{cases} hp_1 = \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j - i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{JK}, \\ \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j - i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1); \end{cases}$$

Решаем второе уравнение системы:

$$\frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j - i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1);$$

$$\frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) - \frac{i_1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1);$$

$$i_1 \left(\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \frac{1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 \right) = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - \frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1);$$

$i_1 = \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - \frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{\left(\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \frac{1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 \right)}$	(11)
$hp_1 = \frac{1}{JK} \sum_{j=jn}^{jk} hs_j - \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - \frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{\left(\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \frac{1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 \right)} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)$	(12)

2 расчетный случай – оптимизация уклона элемента профиля при

заданной начальной отметке – решается аналогично первому, но управляемой переменной является только уклон (операция выполняется на первом, втором и четвертом шагах цикла):

$$F = \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2.$$

$$\frac{\partial F}{\partial i_1} = 0,$$

$$2 \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j) \cdot (ss_j - sp_1) = 0,$$

$$hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) = 0,$$

$$hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1),$$

$i_1 = \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2}$	(13)
--	------

3 расчетный случай – оптимизация взаимного расположения двух элементов профиля при известных начальной отметке первого элемента и длинах элементов (операция выполняется на третьем шаге цикла).

Оптимизационная задача:

$$\sum_{j=jn1}^{jk1} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} (hp_1 + i_1 \cdot dp_1 + i_2 \cdot (ss_j - sp_1 - dp_1) - hs_j)^2 \rightarrow \min$$

Пусть $a = ss_j - sp_1$, $b = ss_j - sp_1 - dp_1$.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial i_1} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial i_2} = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2 \cdot \sum_{j=jn1}^{jk1} (hp_1 + i_1 \cdot a - hs_j) \cdot a + 2 \cdot \sum_{j=jn2}^{jk2} (hp_1 + i_1 \cdot dp_1 + i_2 \cdot b - hs_j) \cdot dp_1 = 0, \\ 2 \cdot \sum_{j=jn2}^{jk2} (hp_1 + i_1 \cdot dp_1 + i_2 \cdot b - hs_j) \cdot b = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + i_1 \sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a + \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 + i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1 = 0, \\ \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b + i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1, \\ i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b; \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \\ i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2}; \end{array} \right.$$

Решим первое уравнение системы:

$$\begin{aligned} & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 \\ & = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \\ & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 - \frac{(\sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b)^2}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \right) = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \\ & - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 \\ & i_1 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1}{\left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 - \frac{(\sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b)^2}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \right)} \\ & i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1}{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - \frac{\left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 - \frac{(\sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b)^2}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \right)}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2}}; \end{aligned}$$

$$i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b;$$

$$i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b,$$

$i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1,$	$\sum_{j=jn2}^{jk2} b \neq 0;$
---	--------------------------------

Подставим решение в первое уравнение системы:

$$i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1,$$

$$\begin{aligned} & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + \left(\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \right) \cdot dp_1 = \\ & = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \\ & = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1 \\ & + \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \end{aligned}$$

$$i_1 \cdot \sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1,$$

$$i_1 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j}{\sum_{j=jn1}^{jk1} a} - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1}{\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2} \quad \sum_{j=jn1}^{jk1} a \neq 0;$$

$$i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b}, \quad \sum_{j=jn2}^{jk2} b \neq 0;$$

$$i_1 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j}{\sum_{j=jn1}^{jk1} (ss_j - sp_1)} - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1}{\sum_{j=jn1}^{jk1} (ss_j - sp_1)^2} \quad \sum_{j=jn1}^{jk1} (ss_j - sp_1) \neq 0;$$

$$i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1}{\sum_{j=jn2}^{jk2} (ss_j - sp_1 - dp_1)}, \quad \sum_{j=jn2}^{jk2} (ss_j - sp_1 - dp_1) \neq 0;$$

Реализация разработанного алгоритма была осуществлена в концепте ПК **Sterna**. Рисунок 45 иллюстрирует результат спрямления профиля данным методом на одном из участков, выбранных для расчета.

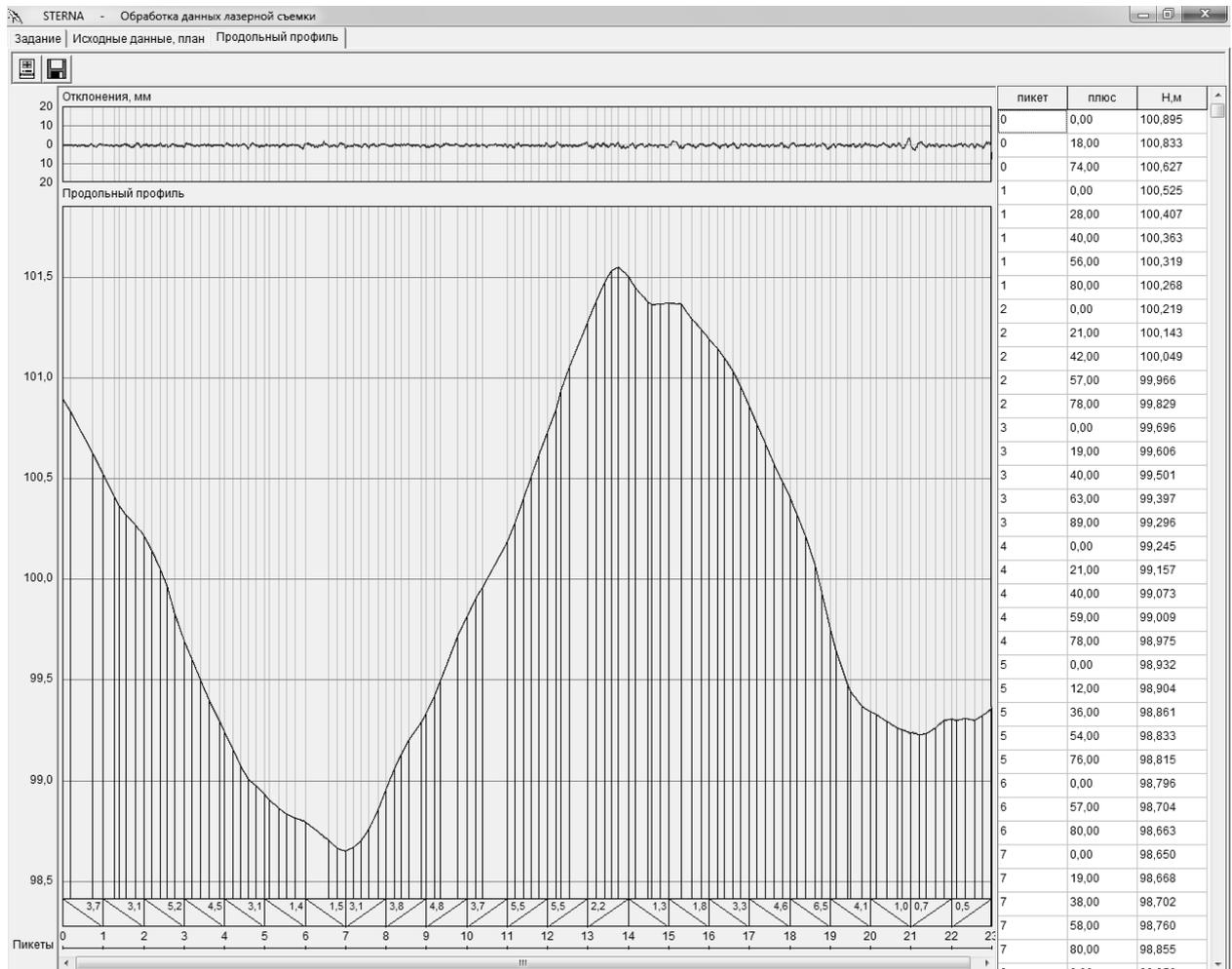


Рисунок 45 – Спрявление профиля в программе **Sterna**

Для выбранного участка исходные данные получены с использованием тележки *Amberg* [21], средствами МЛС.

В результате работы алгоритма пространственная математическая модель трассы существующей железнодорожной линии представляет

сплайн:

$M = (S, P, I)$, где

$S = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_N)$ – длина элементов сплайна;

$P = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_N)$ – кривизна элементов сплайна;

$I = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_N)$ – продольные уклоны элементов сплайна;

$j = 1, 2, 3, \dots, N$;

N – число элементов сплайна.

Продольный уклон и кривизна в пределах каждого элемента сплайна постоянны. Между опорными точками интерполяция отметок осуществляется по линейному закону. Для привязки к проектной системе координат задаются: геодезические координаты первой точки, X_1 , Y_1 , H_1 , и начальный дирекционный угол.

Продольный профиль существующей линии спрямляется не только для определения уклонов и длин элементов профиля, но и для уточнения границ и числа элементов сплайна, так как перелом профиля, в общем случае, может не совпадать с границей элементов сплайна, полученных при обработке данных по плану линии. В этом случае в точке перелома профиля образуется дополнительная граница сплайна, соединяющая два элемента однообразной крутизны в профиле и однообразной кривизны в плане.

2.7 Выводы по второй главе

В ходе исследования были разработаны методы обработки исходных данных: определены способы упорядочивания входной информации, поиска и удаления ложных и ошибочных точек.

Единая модель трассы железнодорожного пути, используемая на всех этапах жизненного цикла линии была признана оптимальной. Пространственный характер этой модели предполагается учитывать за счет внесения уточнений в термины классической теории проектирования железных дорог.

Изложены теоретические основы, методика и технология создания аппроксимационных моделей, применяемых для проектирования реконструкции плана трассы железнодорожного пути. Аппроксимационные модели обеспечивают сглаживание аппаратных погрешностей геодезических измерений при использовании таких методов съемки как лазерное сканирование, спутниковое зондирование и видеопаспортизация.

В качестве типа сплайна предлагается использовать отрезки круговых кривых, поскольку установлены их преимущества по сравнению с другими типами, моделирование очертания трассы пути с помощью таких сплайнов определено как наиболее правдоподобное.

Моделирование продольного профиля железнодорожной линии предлагается осуществлять доработанным методом «спрямления с возвратами».

Разработаны алгоритмы, описывающие методику, и частично (на уровне концепта) программно реализованы.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ДЛЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СЪЁМКИ

3.1 Проблемы исходных данных

Как и у любой, находящейся на стадии становления технологии, у лазерного сканирования есть ряд недостатков, однако, его высокий потенциал очевиден. Преимущества и недостатки разновидностей ЛС сведены в таблицы 1 и 2. Оптимизировать метод можно путем нейтрализации его недостатков.

Таблица 1 - Преимущества мобильного лазерного сканирования перед традиционной тахеометрической съемкой

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> • скорость сбора исходных данных; • мгновенная трехмерная визуализация; • информативность результатов; • безопасность при съемке труднодоступных и опасных мест; • точность. 	<ul style="list-style-type: none"> • дороговизна метода; • трудоемкость обработки результатов ЛС.

Таблица 2 - Преимущества мобильного лазерного сканирования перед воздушным лазерным сканированием

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> • детальность облаков ТЛО 	<ul style="list-style-type: none"> • снижение точности за счет затенения сигналов спутника

Снизить дороговизну возможно, увеличив объемы работ, выполняемых одной установкой лазерного сканирования, либо, применяя высокопроизводительные лазерные сканеры.

Снизить трудоемкость обработки результатов лазерного сканирования представляется возможным за счет создания специализированного программного модуля, снижающего необходимость человеческого вмешательства в процесс создания ЦМР: из огромного количества точек, принадлежащих земной поверхности, модуль создает укрупненную выборку достаточных точек и генерирует по ним цифровую модель.

Ликвидировать затенение сигналов спутника на данный момент не представляется возможным.

При традиционной геодезической съемке обычными тахеометрами проблемы связаны с выделением конкретных объектов (для этого используется семантика - коды точек) и распознаванием последовательности точек линейных объектов (в исходном облаке точек их последовательность может быть нарушена). Эти проблемы были успешно решены в программе **Slavia**, которая в модифицированном виде вошла в состав САПР КРП [16], типового решения ОАО Росжелдорпроект, (**KapremSurvey** или Капрем Съемка), а также в **GeoniCS** ЖЕЛДОР (**GeoniCS** Съемка) [15].

Методы, используемые для решения данных проблем, описаны в главе 2, п.2.1.

При лазерной съемке (см. глава 1, п.1.3.2) одной из проблем является большая мощность облака точек (сотни миллионов и миллиарды точек), не несущих семантической информации. В этом случае, выделение в данном облаке, например, точек, определяющих положение оси пути, само по себе представляет собой самостоятельную задачу, решаемую с использованием специализированных программных средств.

Обработка результатов мобильного лазерного сканирования

Обработка результатов МЛС для дальнейшей их передачи в проектный отдел – задача, требующая значительных временных и трудовых затрат. Первым шагом обработки результатов МЛС для проектирования железных дорог является назначение осей путей. В

современном программном обеспечении для обработки результатов сканирования может наличествовать функционал, позволяющий распознать конфигурацию рельса (рисунок 46) и векторизовать рельсовую нить в уровне верха головки рельса (рисунок 47).

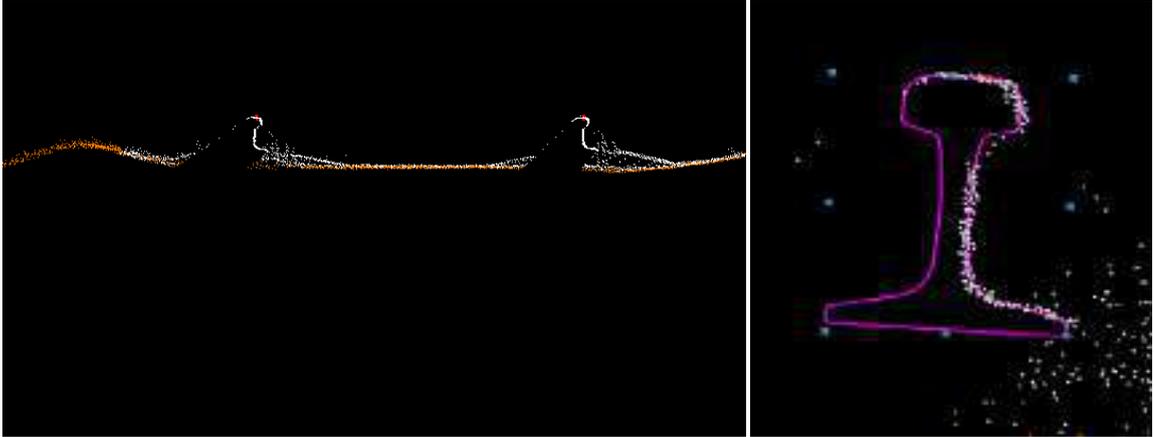


Рисунок 46 – Распознавание конфигурации рельса в сечении

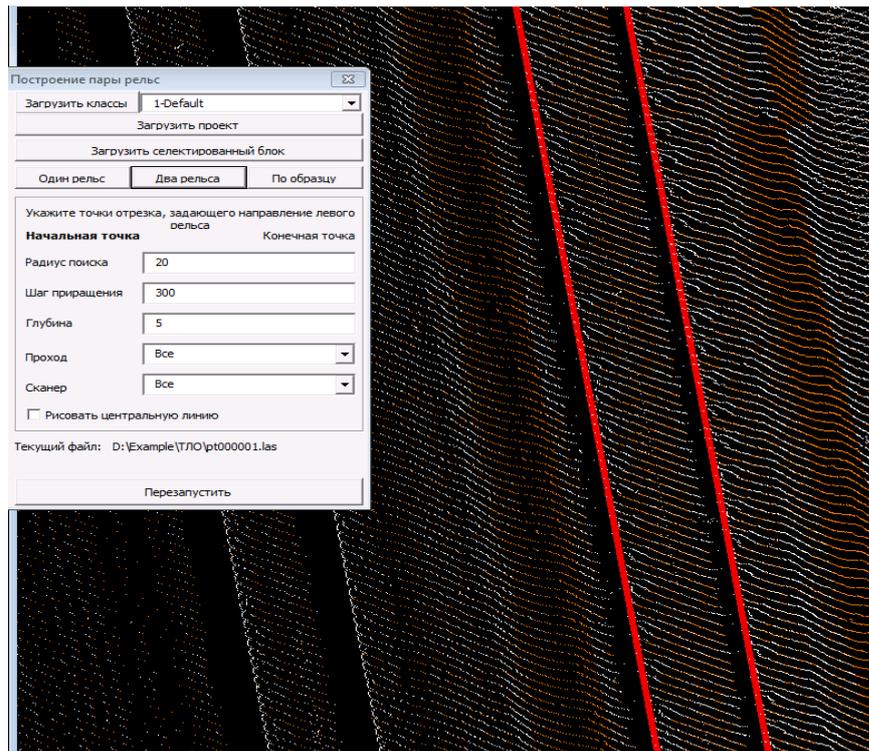


Рисунок 47 – Векторизация рельсовых нитей

Сместив рельсовые нити внутрь на половину величины колеи, получают пространственное положение оси железнодорожного пути, тем самым план и продольный профиль существующей линии в уровне существующей головки рельса.

Вторым необходимым компонентом проектирования железных дорог является цифровая модель рельефа (ЦМР). Для создания ЦМР достаточно выделить из массива результатов лазерного сканирования точки, принадлежащие земной поверхности и сгенерировать любую доступную ЦМР, например, триангулятивную. С ее помощью поперечные профили, а также продольные профили по отметкам земли и бровки земляного полотна создаются в автоматическом режиме.

Программное обеспечение позволяет выполнять заливку облаков точек по высоте (рисунок 48), такой режим отображения облаков ТЛО более нагляден, облегчает восприятие картины обработчиком. Кроме того, в случае использования сканеров, оснащенных камерами, множество точек пространства можно совместить с ортофотопланами.

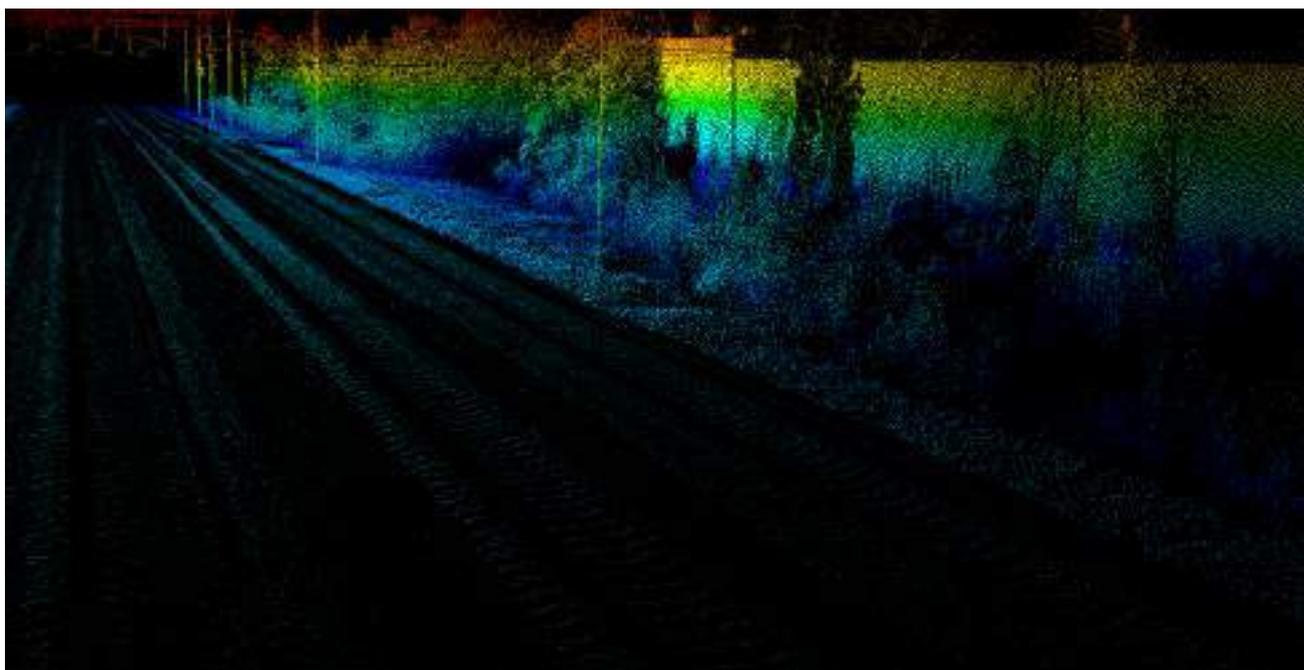


Рисунок 48 – Режим отображения ТЛО «Заливка по высоте»

Данные, полученные посредством МЛС, обладают высшей степенью информативности: есть возможность отображения на созданном в автоматическом режиме поперечном профиле всех ТЛО, принадлежащих секущей плоскости (рисунок 49), что поможет при определении габаритов, границ площадных объектов (болот, лесов, лугов).

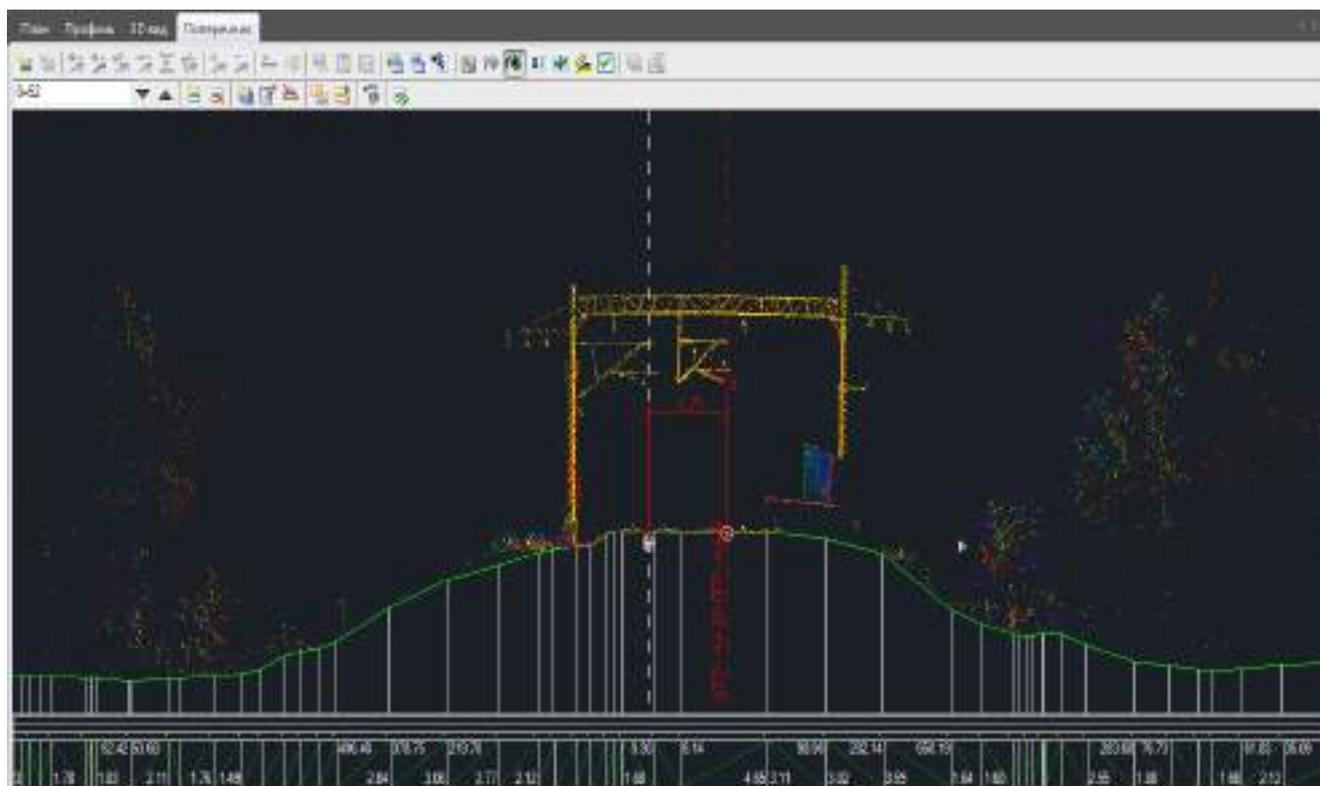


Рисунок 49 – Отображение ТЛО и ЦМР на поперечном профиле

При обработке массива ТЛО также можно назначить семантику: сделать выборку характерных точек объектов, присвоив им определенные коды. Например, распознав визуально в облаке ТЛО опоры контактной сети (рисунок 50), необходимо выбрать и построить такое поперечное сечение массива, в которое попадут характерные точки этих опор, другими словами, те точки, которые отмечаются вешкой при традиционной тахеометрической съемке и в полученном поперечном сечении назначить закодированную точку опоры контактной сети (рисунок 51). В случае назначения семантических кодов габариты и границы площадных объектов сгенерируются в автоматическом режиме. Выбор того или иного варианта развития событий продиктован потребностью объемов выходных данных. Процесс назначения кодов характерным точкам объектов очень трудоемкий и трудозатратный.

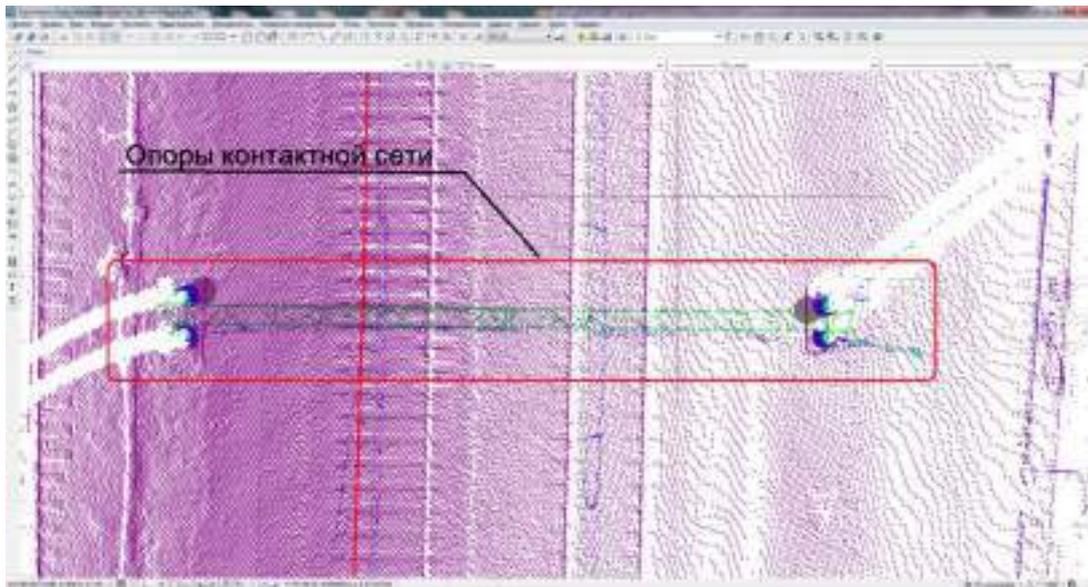


Рисунок 50 – Выбор сечения из облака ТЛО

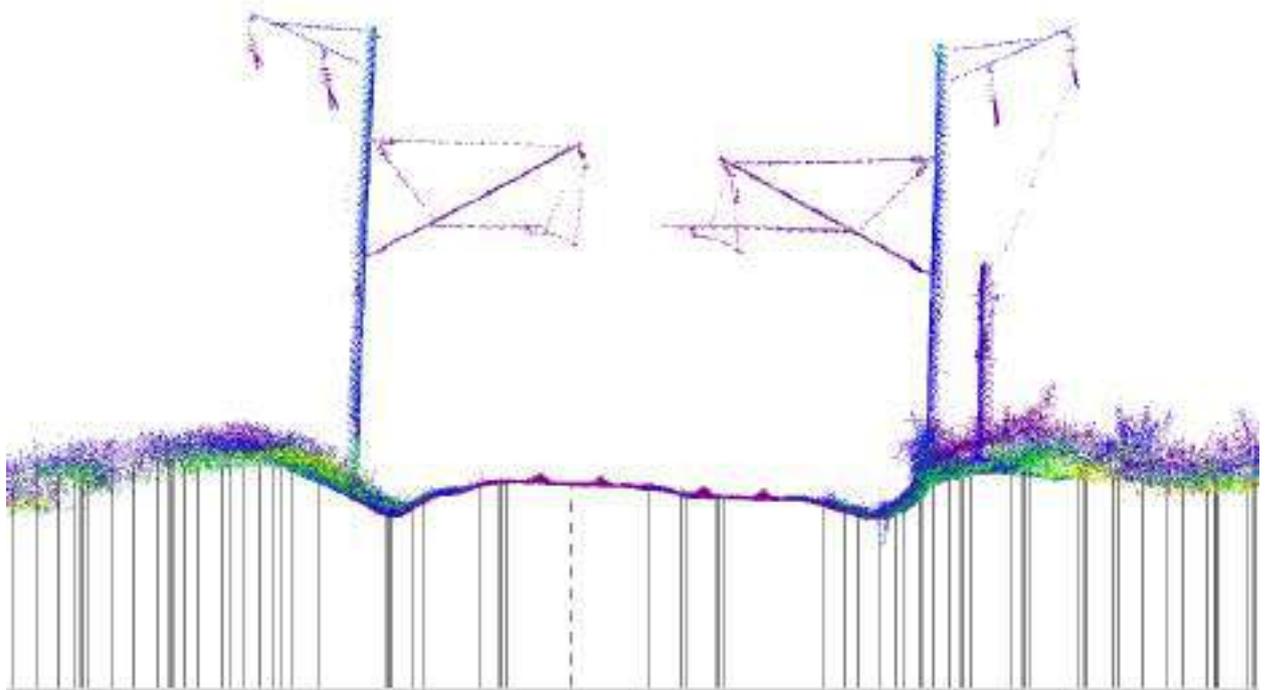


Рисунок 51 – Поперечное сечение массива ТЛО

Во многих современных системах автоматизированного проектирования кодирование точек позволяет предусмотреть соблюдение габаритов в автоматическом режиме. Прокладывая новое положение оси реконструируемого пути, проектировщик будет видеть предупреждения, появляющиеся при несоблюдении установленного габарита (рисунок 52).

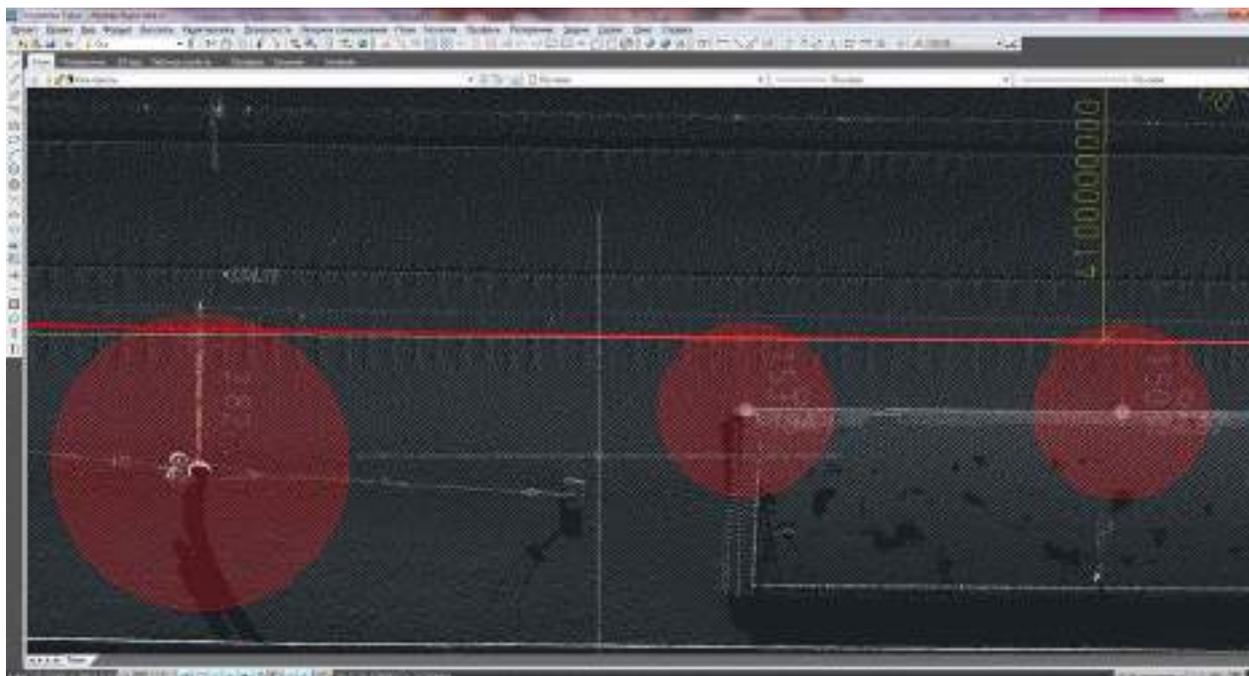


Рисунок 52 – Предупреждения о несоблюдении габаритного расстояния

При использовании измерительных тележек и роботизированных тахеометров для геодезической съемки непременно возникают проблемы, связанные с потерей видимости роботом-тахеометром отражателя, препятствием может служить любой элемент путевого обустройства, например, опора контактной сети. При потере отражателя из виду тахеометр начинает искать его, создавая при этом ложные точки (рисунок 53), при этом истинные и нужные точки остаются неучтенными – образуются пропуски в исходных данных съёмки. Анализируя опыт таких съемок, удалось установить максимальную длину таких пропусков – 5,5м (средний шаг съёмки точек – 0,1м). Наличие пропусков исходных данных практически не снижает точность координирования оси пути, однако, должно приниматься во внимание.

При остановке тележки также возникает облако ложных, практически дублирующихся точек. В данном случае такие точки должны быть исключены из исходных данных, алгоритмы распознавания последовательности точек описаны в главе 2, п.2.1. Решается установленная проблема в рамках разработанного метода благодаря использованию аппроксимационной модели трассы пути (глава 1, п.1.1.2).

Положение ложных точек резко отличается от положения линии оси пути, полученного в результате регрессивного анализа (МНК).

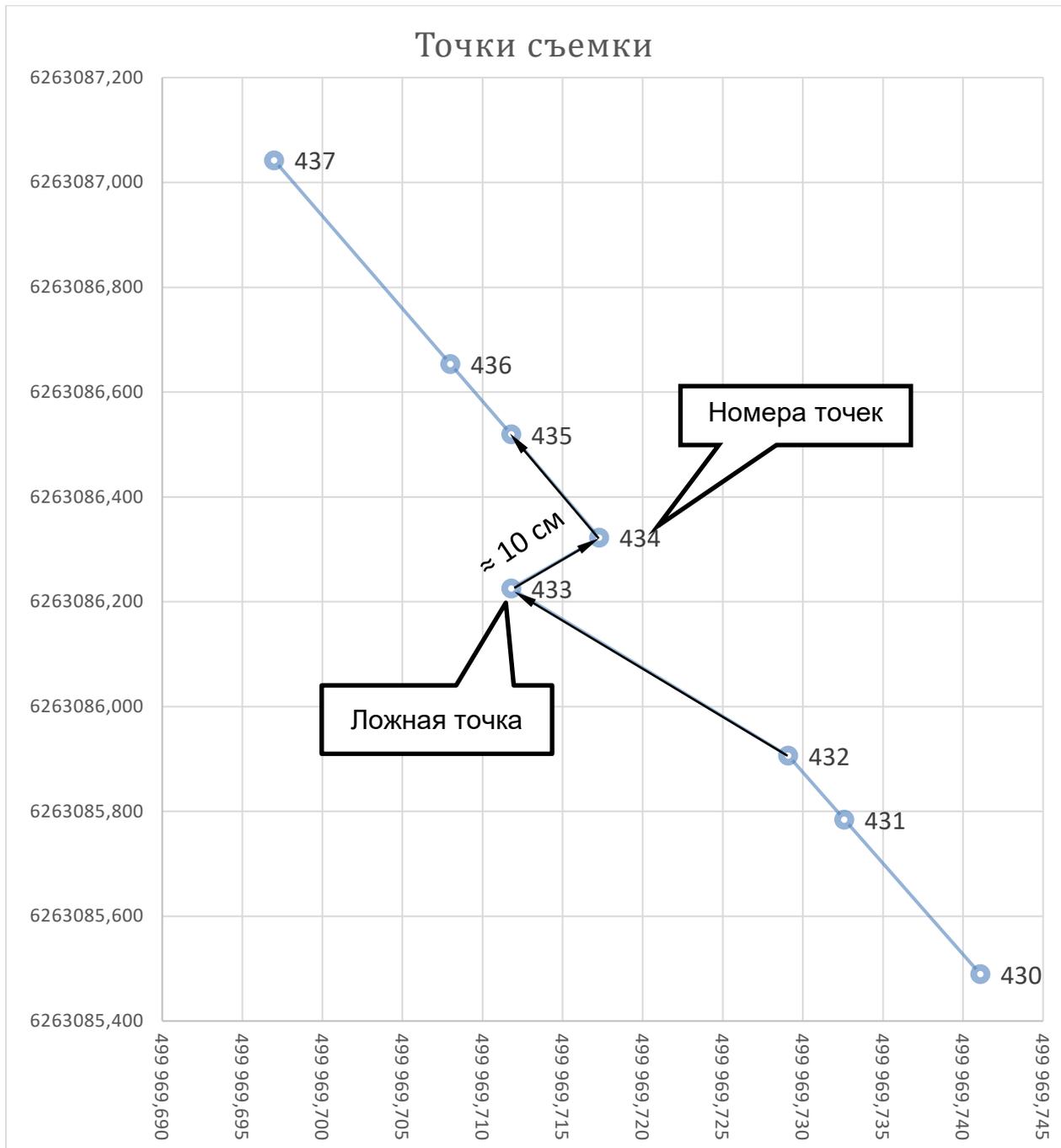


Рисунок 53 - Последовательность точек съёмки тележкой Amberg, точка с номером 433– ложная

Помимо вышеупомянутых проблем исходных данных именно съёмки посредством лазерного сканирования следует отметить также искажение исходных данных и появления в результате ошибочных точек. Примером такого искажения может служить солнечный блик на рельсе или помеха/ограничение видимости, которые помешают сканеру зафиксировать

часть точек очертания рельса. Неполные данные о конфигурации сечения рельса с большой вероятностью приведут к ошибочным значениям координат точки существующей головки рельса.

Существующие методы расчётов параметров кривых, как правило, используют в качестве модели плана модель в криволинейной системе координат, где осью абсцисс является ось пути. Расчёт осуществляется графоаналитически с помощью угловой диаграммы или графика кривизны (стрел). Переход от данных о положении точки съёмки в формате прямоугольной системы координат осуществляется с неотъемлемой погрешностью, которая тем не менее допускаема, но лишь в том случае, если координаты точки истинны. Если же положение съёмочной точки окажется ошибочным или ложным (издержки методов лазерного сканирования), то погрешность может превысить нормируемое значение (рисунок 54).

Установленные проблемы решаются также за счёт использования аппроксимационной модели трассы пути – математического ожидания положения оси пути.

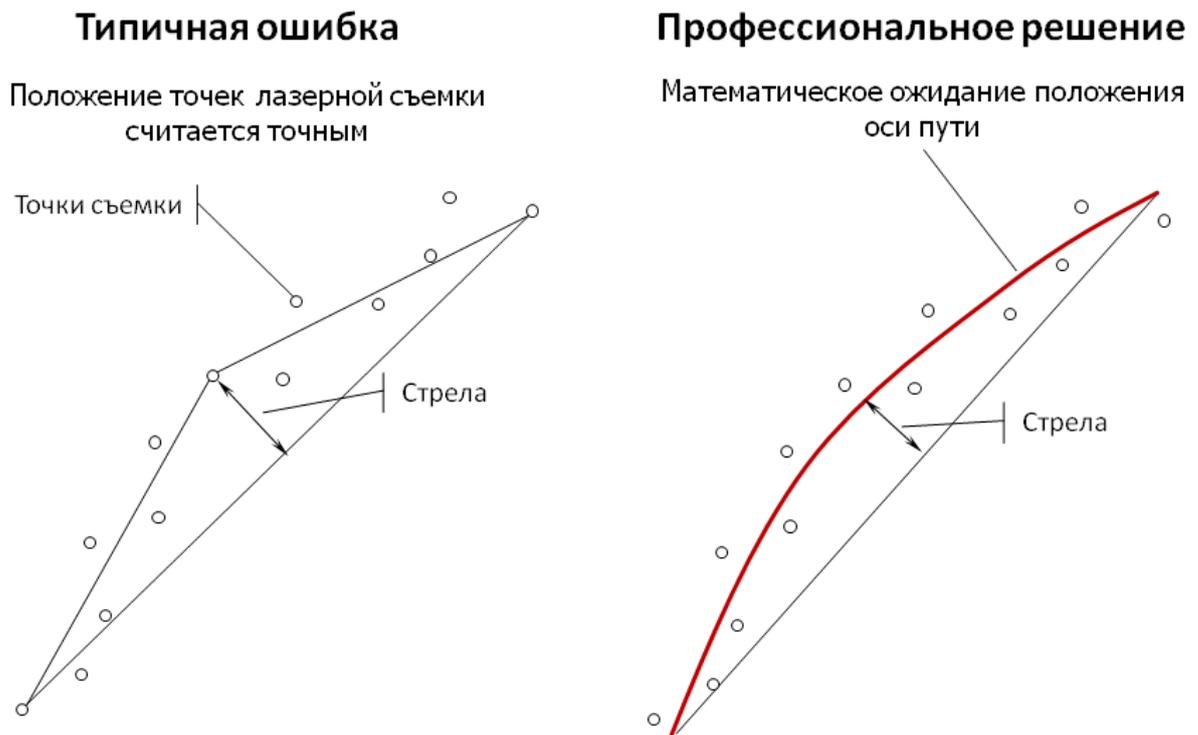


Рисунок 54 – Определение стрелы изгиба в произвольной точке съёмки

Рассматривая исходные данные, полученные с помощью тележки **Amberg** можно столкнуться с проблемой трактовки уширения колеи в кривых (рисунок 55). В случае, когда ось пути смещается на половину расстояния между головками правой и левой рельсовых нитей, получаем верное положение линии оси пути. В случае, если данные по одной нити отсутствуют, или линия оси пути получается смещением головки одной из рельсовых нитей на величину половины стандартной колеи, получаем неверное положение линии оси пути.

Положение трассы пути в кривых определяется посередине между правой и левой нитью и в среднем по высоте (рисунок 55), в то время как нормы проектирования предписывают отметку оси пути в кривых принимать по **нижней** головке рельса. Применение аппроксимационной модели трассы пути поможет решить обозначенную проблему.

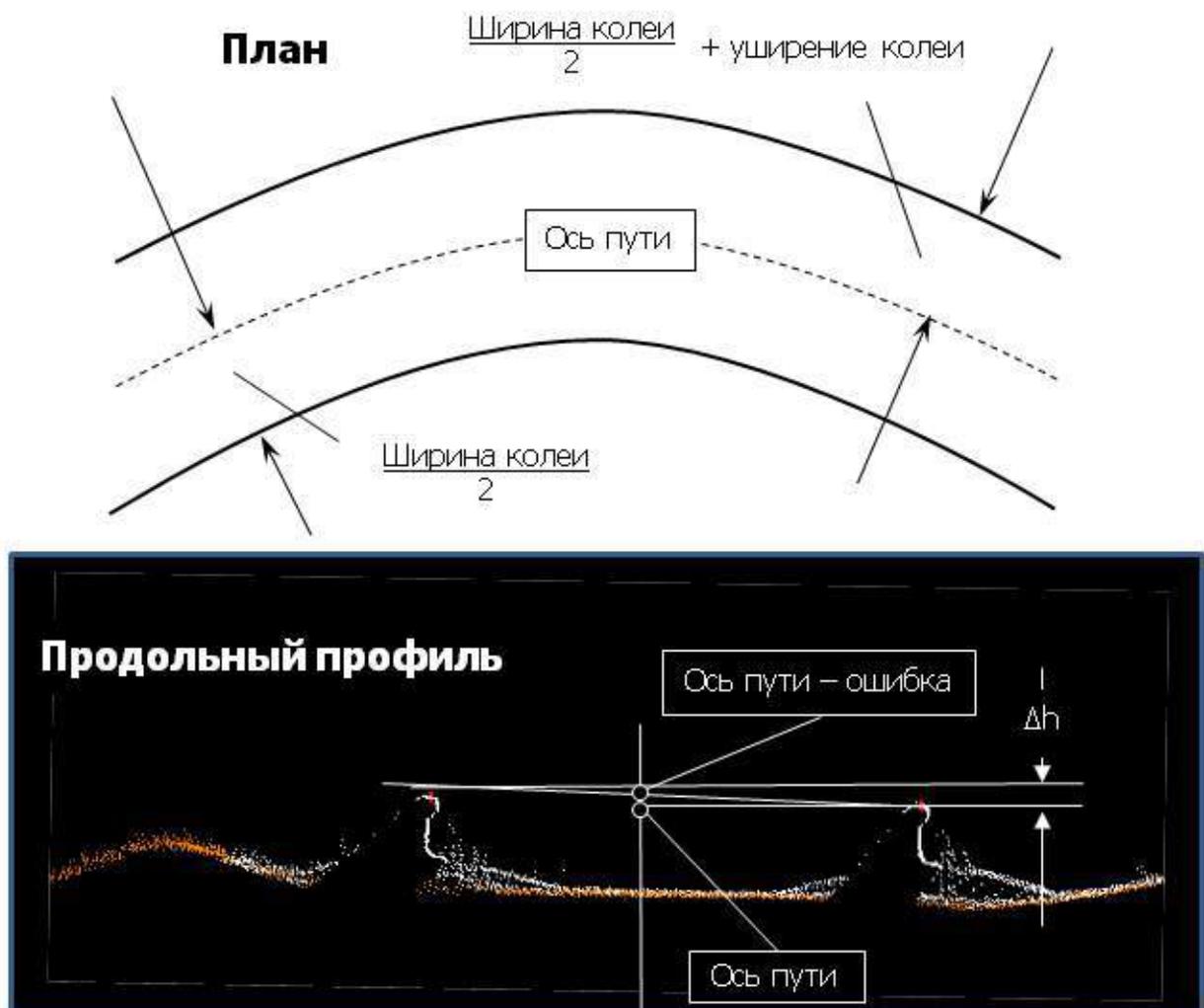


Рисунок 55 – Определение положения оси пути в кривых

3.2 Предобработка исходных данных для моделирования трассы железнодорожного пути

Исходные данные для **Sterna** представляют множество точек оси пути, каждая из которых задается тремя пространственными координатами. В привязке к пикетажу шаг точек в пикетаже составляет обычно от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Предобработка исходных данных заключается в обнаружении и удалении ложных и избыточных точек (см. п.3.1) – точек, расстояния от которых до ближайших менее половины среднего шага съемки, составляющего обычно 0,1 м. При вводе данных ведется протокол удаления ложных и избыточных точек, рисунок 56.

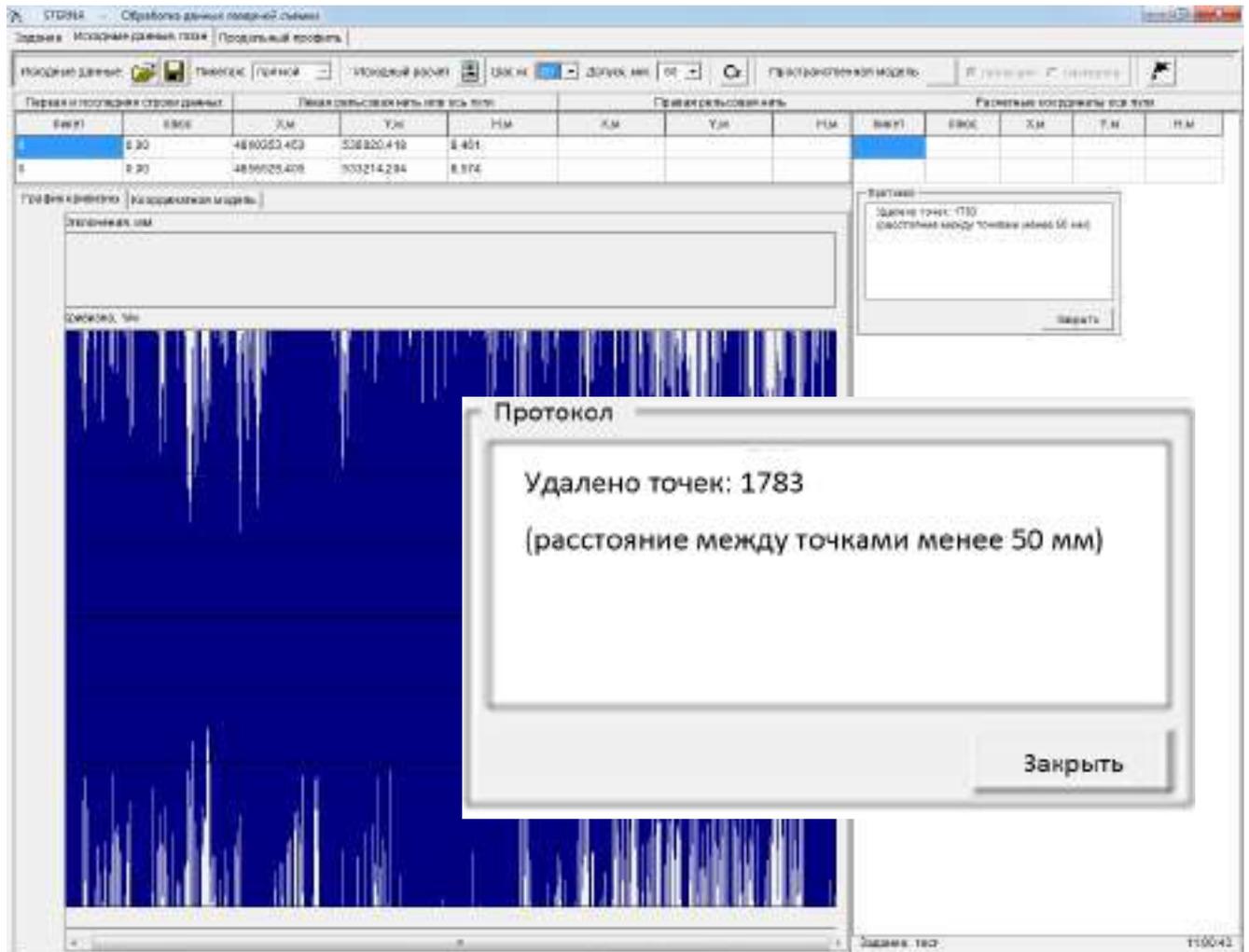


Рисунок 56 - Протокол ввода и контроля исходных данных (**Amberg**), длина участка 5.1 км, 40000 точек

Первостепенной задачей концепта **Sterna** является преобразование обширного количества трехмерных точек в удобную выборку опорных точек оси пути, другими словами, регуляризация и глобализация исходных данных.

Сначала ведется расчёт расстояний между точками съёмки, в первую очередь попарно, а затем нарастающим итогом. Последовательно выделяются участки регуляризации и точки, им принадлежащие, в соответствии с заданным интервалом расположения точек трассы железнодорожного пути. На каждом участке регуляризации массив данных аппроксимируется полиномом третьей степени. В **Sterna** аппроксимация осуществляется методом наименьших квадратов.

Считается, что опорные точки принадлежат этим полиномам. Начиная со второй группы точек, на стыках отрезков регуляризации опорным точкам присваиваются средние значения координат для парных полиномов, рисунок 57.



Рисунок 57 – Регуляризация исходных данных (предобработка)

3.3 Проектирование реконструкции железных дорог

Проектирование реконструкции плана железнодорожного пути – процесс, состоящий из двух этапов: распознавания структуры плана и оптимизации проектного решения. В ходе исследования были разработаны алгоритмы распознавания структуры плана, доработан метод спрямления с возвратами (глава 2, п.2.6) согласно исходным данным в виде модели пути

осуществлен переход от итерационной оценки вариантного решения к аналитической.

Структура плана - последовательность элементов плана по типам и длине. Распознавание структуры плана – выявление участков однообразной кривизны (прямых, круговых кривых), в результате которого формируется первое приближение управляемых переменных с целью получения оптимальных окончательных сдвигов. Полученное проектное решение должно удовлетворять всем ограничениям по сдвигам.

Распознавание структуры плана производится по графику стрел изгиба. В случае если исходными данными служат точки оси участка пути в координатах, необходимо осуществить переход и построить график стрел изгиба, так как его использование для распознавания структуры плана в настоящее время является наилучшим методом. Задача распознавания не только в минимизации количества участков однообразной кривизны, но и в максимальном приближении проектного решения к существующему очертанию плана трассы пути. Выявление мест изломов на прямых осуществляется посредством координатных моделей.

Полученные проектные сдвиги оптимизируются, затем выполняется оптимизация структуры плана путем последовательного попарного объединения смежных участков однообразной кривизны. Цикл оптимизационной процедуры состоит из череды типовых операций для каждой из пар смежных элементов на протяжении всего расчетного участка. Черода операций складывается из:

1. оптимизации проектных сдвигов для выбранной структуры плана;
2. проверка оптимизированных сдвигов на их допустимость;
3. сохранение лучшего по критерию варианта.

В том случае если в круге цикла появляется решение лучше исходного по критерию, оно запоминается как исходное, и цикл повторяется с меньшим числом элементов, в противном случае процедура завершается.

Первым шагом распознавания структуры плана является формирование исходного графика кривизны проектного пути из графика кривизны существующего пути – спрямление ломаной. Начальным и конечным элементом результирующей ломаной являются прямые, промежуточные элементы представляют собой строгое чередование наклонных (переходные кривые) и горизонтальных участков (круговые кривые и прямые). Аппроксимация для формирования исходного для расчёта графика кривизны может осуществляться любым из двух известных методов. Первый заключается в укладке элемента минимальной, с точки зрения норм проектирования длины, оптимизация его положения методом наименьших квадратов и в случае ненарушения допустимости сдвигов постепенное увеличение его длины до максимальной. Второй подразумевает укладку элемента однообразной кривизны максимальной длины, с точки зрения допускаемых сдвигов, и дальнейшие вариации сопряжения таких элементов переходными кривыми.

Полоса аппроксимации дифференцирована: ее ширина изменяется в зависимости от кривизны предшествующего участка. Если предшествующим участком является прямая, то полоса аппроксимации устанавливается узкой для распознавания кривых участков больших радиусов; если же предшествующий участок – кривая, то полоса аппроксимации устанавливается шире для исключения излишнего дробления круговой кривой на участки разного радиуса. Тем не менее полоса аппроксимации является узкой и полученная однорадиусная кривая может являться результатом оптимизации кривой с изначально большим числом элементов.

Типовую операцию процесса распознавания структуры планы схематично иллюстрирует рисунок 58. Она заключается в оптимизации положения границы смежных элементов ломаной. Укладывается i -ый элемент плана максимальной длины в некотором коридоре отклонений по кривизне, затем аналогично $i+1$ -ый элемент максимальной длины, после

чего методом наименьших квадратов производится оптимизация положения этих элементов по отношению к существующему и устанавливается оптимальное положение i -ой границы между отрезками ломаной (элементами плана).

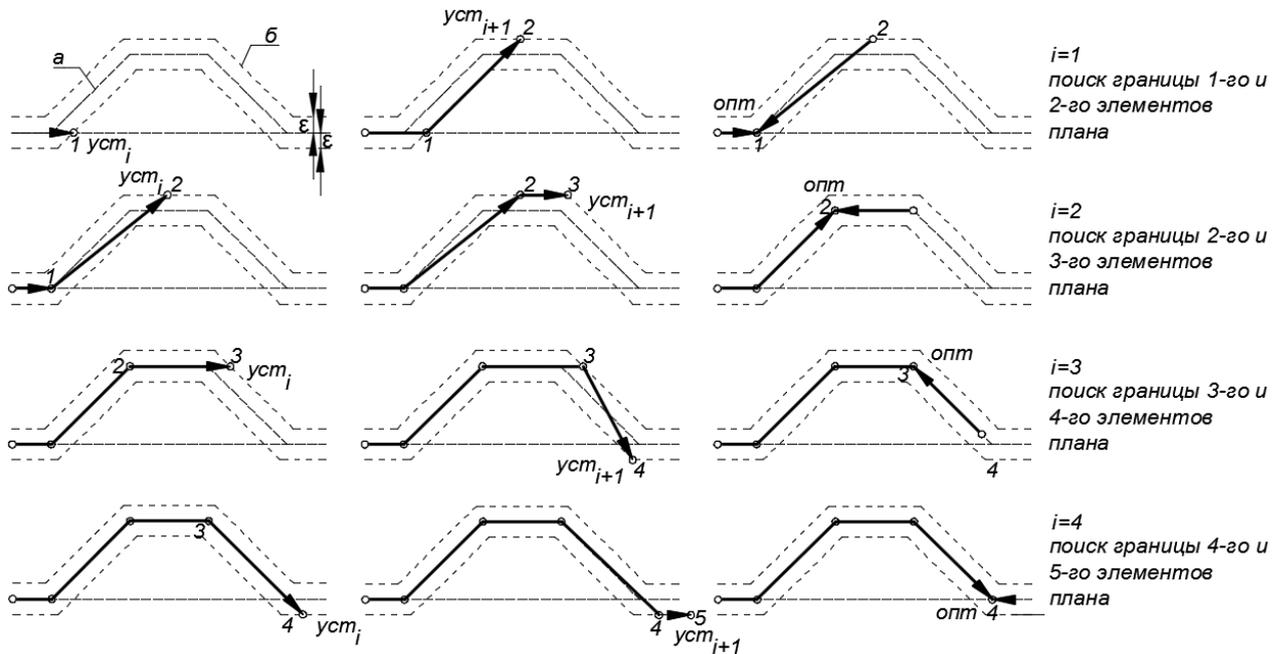


Рисунок 58 – Распознавание структуры плана: а - график кривизны существующего участка пути; б - граница допустимой области по кривизне; ϵ - допуск на отклонения по кривизне; уст - установка границы элемента плана; опт - оптимизация положения границы между элементами плана

Оптимизация полученного графика сдвигов осуществляется за счет изменения длины его элементов. Изменение длины одного из отрезков ломаной возможно путём смещения одной или каждой из его границ на некоторую величину $\pm\delta$. Вариантов такого смещения границ 8. Один из вариантов, при котором обе границы смещаются на величину $+\delta$ показан на рисунке 59. Производя последовательно оптимизацию положения каждого из отрезков ломаной, затронутых каждым из вариантов смещением границ, можно выделить наилучший по критерию вариант.

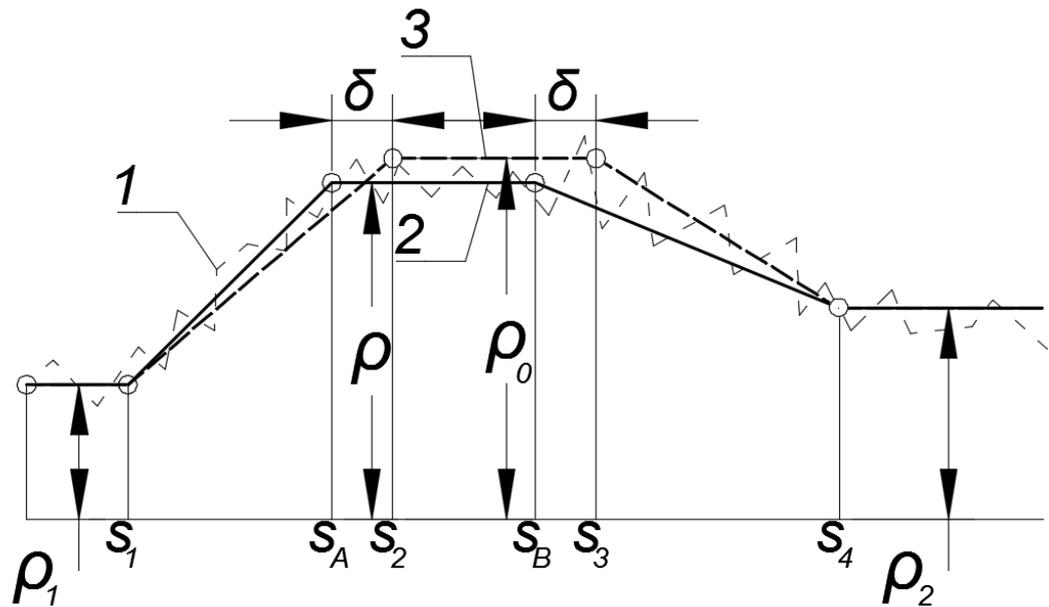


Рисунок 59 – Расчётная схема оптимизации путем смещения границ элементов: 1 – график кривизны существующего пути; 2 – исходный график кривизны проектного пути; 3 – вариантный график кривизны.

Характеристика элемента ρ – кривизна определяется методом наименьших квадратов.

После такой оптимизации осуществляется сглаживание графика проектной кривизны путём уменьшения числа участков много радиусных кривых за счет ликвидации участков малого протяжения или объединения их с соседними.

Рассмотренный метод был реализован программно в концепте **Orca** (рисунок 60), наглядное изображение результатов позволяет убедиться в правильности работы метода. Распознанная структура плана представляется собой совмещенный график существующих и проектных стрел.

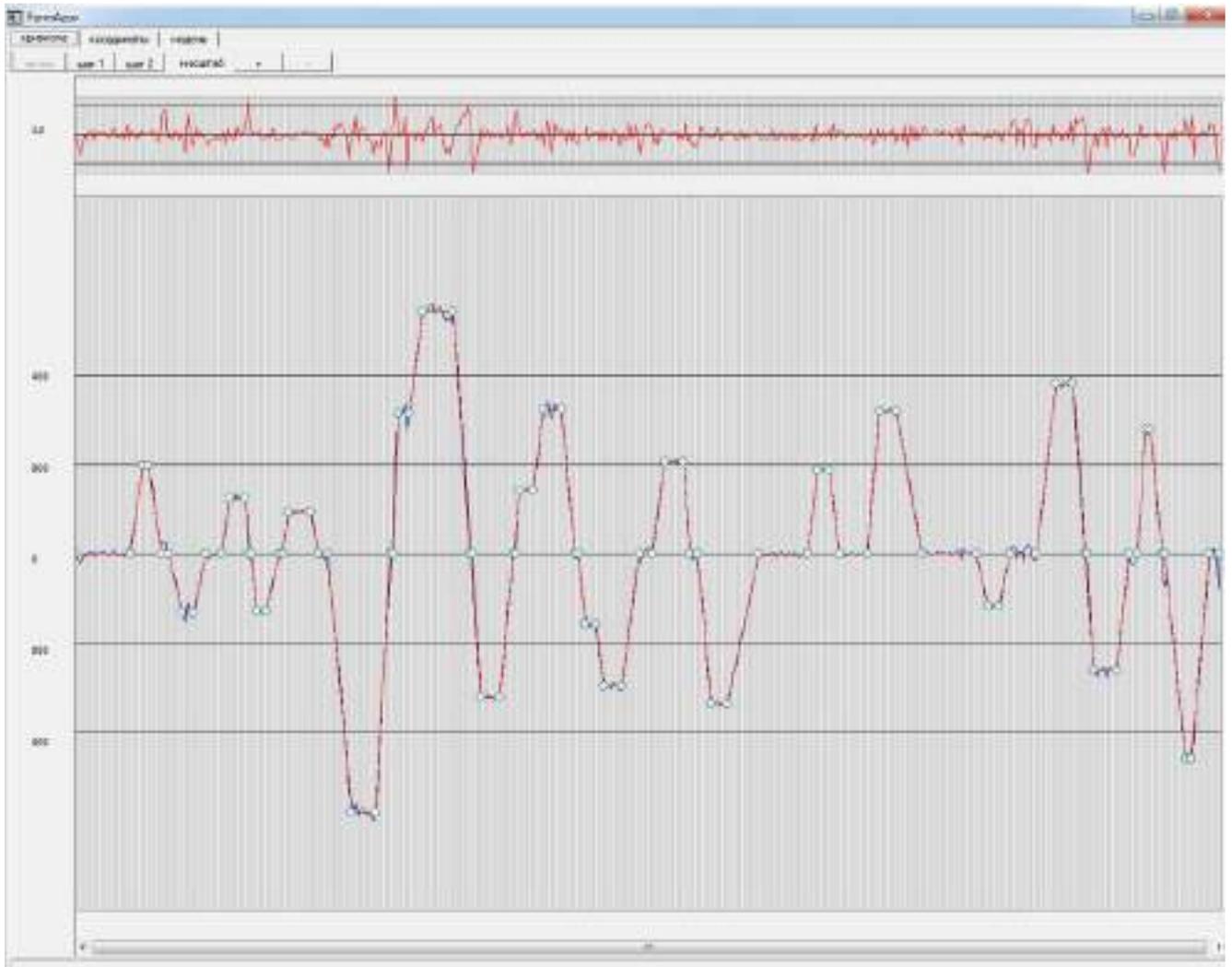


Рисунок 60 - Распознавание структуры плана в концепте Orca

Дальнейшие исследования предполагают разработку алгоритмов оптимизации проектного решения, таким образом, с помощью концепта **Orca** станет возможным проектирование реконструкции плана трассы (рисунок 61). Функционал задач, решаемых с помощью **Orca** реализован за счёт применения координатной (**T**-модель) и координатно-параметрической (**R**-модель) моделей плана, описанных в главе 1, п.1.1.4.



Рисунок 61 – Реконструкция плана трассы железнодорожного пути в концепте Orca

3.4 Регуляризация модели трассы пути

Обширное количество точек исходных данных (~1000 точек/км), а также их хаотичность, превращает любую элементарную процедуру в вереницу громоздких и многоэтапных вычислений. Например, в рамках контроля ширины междупутий или определения габаритов осуществляется решение типичных для процесса проектирования задач, таких как определение координат точки по ее аналитическому пикетажу и обратной. Простое определение координат точки трассы по известному пикетажному положению подразумевает первоначальный поиск порядкового номера одного из N участков трассы, на котором располагается искомая точка, с

целью определения закона, по которому изменяются координаты точек трассы на этом участке, для чего выполняется следующий ряд операций:

1. По пикетажным значениям вычисляется расстояние от начала первого участка до искомой точки; $L_{PK} = PK_x - PK_0$
2. Последовательно нарастающим итогом суммируется длина первого и последующих участков $L = \sum_{i=1}^{i+1} (L_i + L_{i+1})$ до тех пор, пока длина не превышает расстояние от начала первого участка до искомой точки $L \leq L_{PK}$;
3. Если выполняется равенство $L = L_{PK}$, то координаты точки x – координаты точки $i + 1$;
4. В противном случае точка x находится на $i + 1$ -ом участке
5. Координаты точки x определяются в соответствии с законом, по которому изменяется положение трассы на $i + 1$ -ом участке.

Использование регулярной модели трассы пути, под регулярностью понимается по аналогии с понятием регулярной цифровой модели рельефа [35] равенство шагов – расстояний, на котором расположены точки модели. В случае, когда для хранения информации о положении трассы используется регулярная выборка точек, достаточно лишь найти номер десяти-(двадцати-)метрового фрагмента, на котором располагается искомая точка, разделив расстояние от начала рассматриваемого участка на размер регулярного шага (**10 или 20м соответственно**). Номер фрагмента укажет на коэффициенты аппроксимируемого уравнения, таким образом, и на координаты искомой точки.

При решении обратной задачи (определение пикетажного положения точки по ее известным координатам) объём вычислений при использовании нерегулярной и регулярной моделей трассы соответственно пропорционален.

Таким образом, одним из преимуществ регулярных моделей является быстрое действие работающих с ними алгоритмов.

Другим преимуществом является наглядность представления выходных данных – точек трассы. Представление данных в виде чертежа – плана трассы - неоспоримо нагляднее табличного представления в виде массива координат точек. Отобразить на плане все существующие точки, во-первых, не представляется возможным физически. Во-вторых, отрисовка большого количества точек не только не способствует однозначному пониманию очертания плана трассы, но и также может привести к ошибочному представлению о положении оси пути (глава 3, п.3.1).

Следует отметить, что, несмотря на прогрессивное стремление к «безбумажным» технологиям, процесс перехода к такого вида технологиям в сфере проектирования железнодорожных линий на данный момент не близок к завершению. Поэтому представление результатов проектирования по-прежнему осуществляется в виде плана линии с указанием характерных точек. Классические подходы к проектированию подразумевают съемку точек с регулярным шагом как на кривых, так и на прямых участках и соответственно отображение их на плане из соображений наглядности, понятности и информативности. Учитывая, что на некоторых этапах проектирования уже осуществлен переход к «безбумажной» работе, информация обо всех имеющихся точках, может быть доступна пользователю (точки могут быть отображены на невидимых слоях, файл с координатами точек может прилагаться к проектной документации), но из вышеупомянутых соображений рациональнее пользоваться все же регулярной моделью. Обращение к исходным данным может осуществляться по необходимости.

Помимо наглядности преимуществом регулярной модели трассы является информативность. Располагая данными о координатах регулярных узлов трассы, можно с некоторой вероятностью судить о положении любой из точек трассы.

3.5 Выводы по третьей главе

Разработанные в ходе исследования алгоритмы для прикладного метода моделирования исходных данных лазерной съемки позволяют упорядочить эти точки, исключить ошибочные, ложные и избыточные точки.

Специфика исходных данных лазерной съёмки подразумевает наличие случайных, близких к истинному положению, точек, исходя из чего в качестве истинного положения точек модели, было решено принимать математическое ожидание положения точек.

Для решения первоочередной задачи реконструкции плана линии - распознавания структуры плана - решено использовать аналогичный разработанному для проектирования продольного профиля метод «спрямления с возвратами». Реализовать программно этот метод планируется в концепте ПК «**Orca**».

Из соображений быстродействия концепта «**Sterna**», а также информативности, наглядности и удобства проектирования разработанная модель трассы железнодорожной линии является регулярной и представляется в виде точек с регулярным шагом 10 или 20м.

4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Для демонстрации полученных результатов исследования и их практического применения были разработаны алгоритмы, реализованные в концепте **Sterna**. Концепт программного комплекса **Sterna** представляет собой демонстрационное программное воплощение разработанного концептуального решения, сочетающее и реализующее практически для отдельно взятой задачи теоретические основы и методы ее решения (рисунок 62). Демонстрационная форма позволяет сделать выводы о действенности и результативности разработанных в ходе исследования теоретических положений и методики их применения.

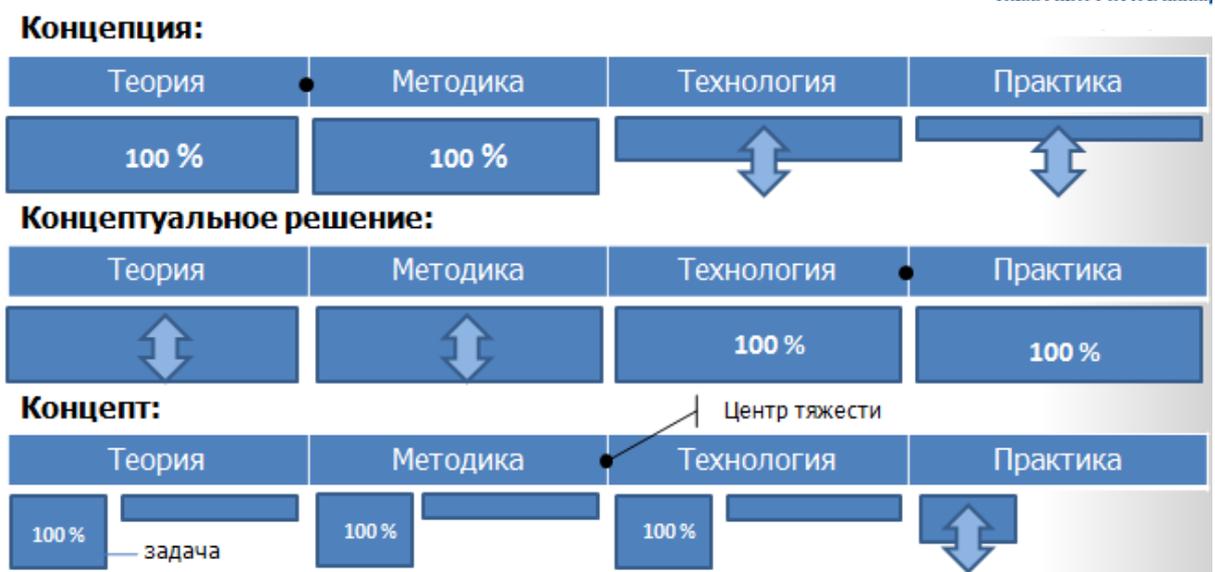


Рисунок 62 – Место концептуального решения среди теории, методики, технологии и практики

4.1 Описание концепта программного комплекса **Sterna**

Функциональная схема работы программного комплекса **Sterna** представлена на рисунке 63. Входная информация через блок импорта исходных данных поступает в блок преобразования данных в математическую модель, в котором удаляются ошибочные и ложные точки, после чего представляется статистика исходных данных; откорректированные данные в следующем блоке преобразуются в

окончательную математическую модель: представляются в виде точек модели с регулярным шагом и графически в виде плана и профиля. Блок экспорта результатов является внутренним, поскольку на сегодняшний день концепт рассматривается как самостоятельный продукт, а не в рамках интеграции с другими ПК.



Рисунок 63 – Функциональная схема Sterna

Исходные данные для **Sterna** представляют множество точек оси пути, каждая из которых задается тремя пространственными координатами. Количество трехмерных точек, получаемых в результате съемки методом лазерного сканирования, очень велико и, как правило, избыточно. (При данном виде съемки расстояние между точками может составлять всего несколько сантиметров). Первостепенной задачей концепта **Sterna** является преобразование обширного количества трехмерных точек в удобную выборку опорных точек оси пути, другими словами, регуляризация и глобализация исходных данных.

Начинается работа со **Sterna** с импорта исходных данных – последовательности упорядоченных по пикетажу точек с тремя

пространственными координатами, определяющими положение трассы линейного сооружения (железнодорожного пути). Предшествующей данному этапу служит процедура выделения из облака точек лазерного отражения вышеупомянутых исходных данных (см. глава 3, п.п. 3.1, 3.2). Выполняется такая предобработка может, например, с помощью специализированного программного обеспечения, прилагающегося к лазерному сканеру. В случае получения исходных данных с помощью измерительных тележек (например, **Amberg**, см. глава 1, п.1.3.3) результаты съёмки импортируются в **Sterna** без дополнительных преобразований. При использовании исходных данных традиционной тахеометрической съёмки координаты точек оси пути могут быть выделены фильтрацией по принятым семантическим кодам.

После выбора пользователем желаемого интервала между точками в выборке: 10 или 20м (рис. 29) и допуска отклонений: 5, 10, 50 или 100мм (оптимальными можно считать 10м [30] и 10мм соответственно) формируется регулярная глобализованная выборка опорных точек.

Выходной информацией служит массив опорных точек с регулярным шагом 10 (20)м. Массив генерируется аппроксимацией результатов роботизированной съёмки полиномом третьей степени. Таким образом, опорные точки соответствуют полиному, но могут иметь расхождения с истинными данными съёмки. Причиной этому служит сглаживание, присущее аппроксимационным моделям (см. глава 1, п. 1.1.2).

При получении исходных данных посредством традиционной тахеометрической съёмки предпочтительнее применять для проектирования интерполяционные математические модели трассы железной дороги, а аппроксимационные модели использовать при работе с данными лазерной съёмки (см. глава 2, п.2.4).

Если рассматривать область задач, решаемую посредством **Sterna**, в рамках проектно-изыскательского комплекса работ (рисунок 64), то эта область охватывает следующий за съёмкой предшествующий

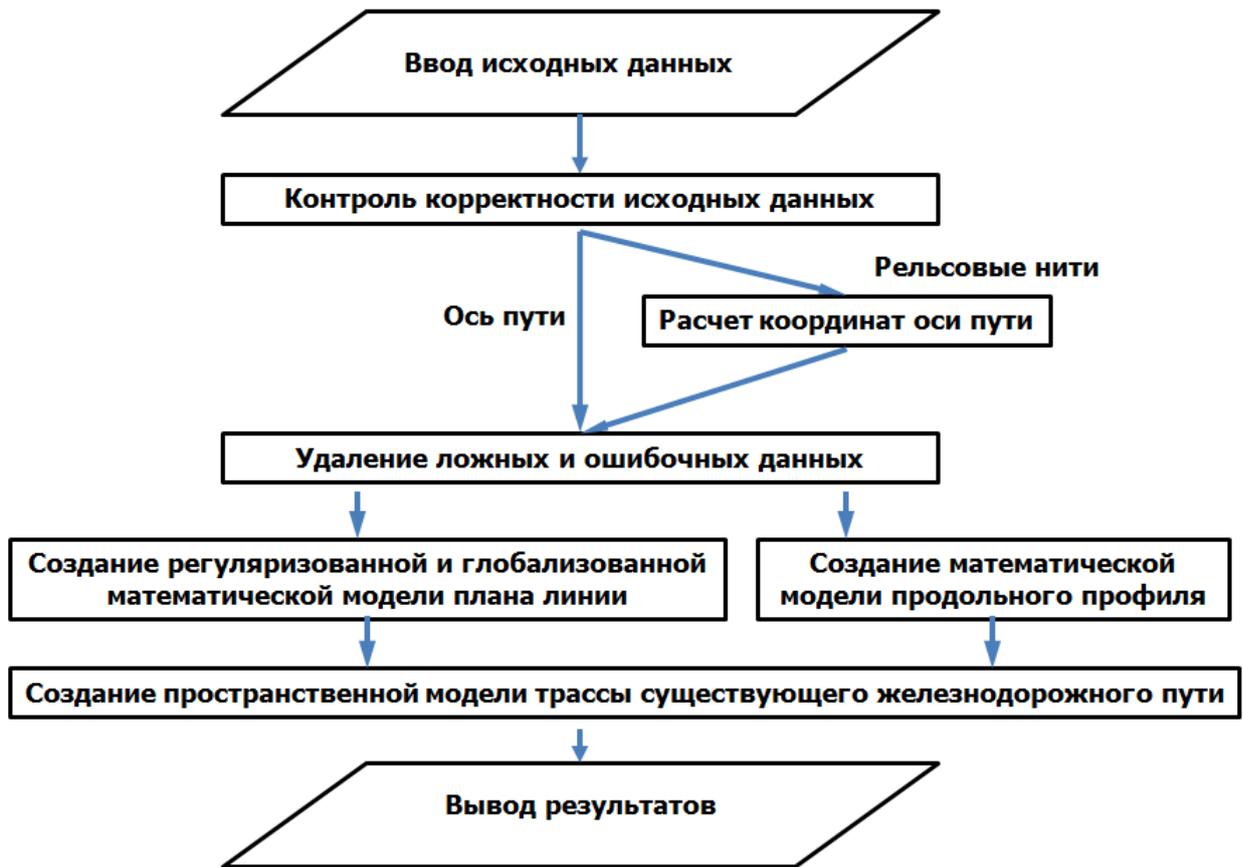
проектированию этап создания модели трассы железнодорожного пути с последующим графическим представлением модели плана.



Рисунок 64 – Схема проектно-изыскательского комплекса работ по реконструкции плана

4.2 Алгоритм разработанного метода

Представленная на рисунке 65 блок-схема **Sterna** иллюстрирует работу концепта: исходные данные проверяются на корректность, затем в зависимости от их типа либо пересчитываются в координаты оси пути (в случае если заданы координаты точек рельсовых нитей), либо сразу фильтруются с удалением ложных и ошибочных точек. Затем создается регуляризованная и глобализованная модель плана линии и математическая модель продольного профиля и окончательная пространственная модель трассы железнодорожного пути. Результаты моделирования представляются в виде табличного массива координат точек с выбранным регулярным шагом, схематичного изображения плана и профиля трассы пути.

Рисунок 65 – Блок-схема *Sterna*

4.3 Программная реализация

Работа с концептом программного комплекса *Sterna* начинается с выбора задания из существующих (вкладка «Задание» главной формы *Sterna*) или выбора в директории места размещения нового задания (рисунок 66). Вкладка «Исходные данные, план» (рисунок 66) содержит компоненты, позволяющие осуществить импорт данных в концепт ПК и выбрать желаемые характеристики результатов, а также наглядно изображает плановое положение модели трассы. Вкладка «Продольный профиль» (рисунок 66) содержит графическую интерпретацию профильного положения трассы пути.

При назначении нового задания требуется ввести его имя (рисунок 67), которое может, например, совпадать с именем перегона. При повторном обращении сохраненное задание отображается в списке заданий под выбранным именем.

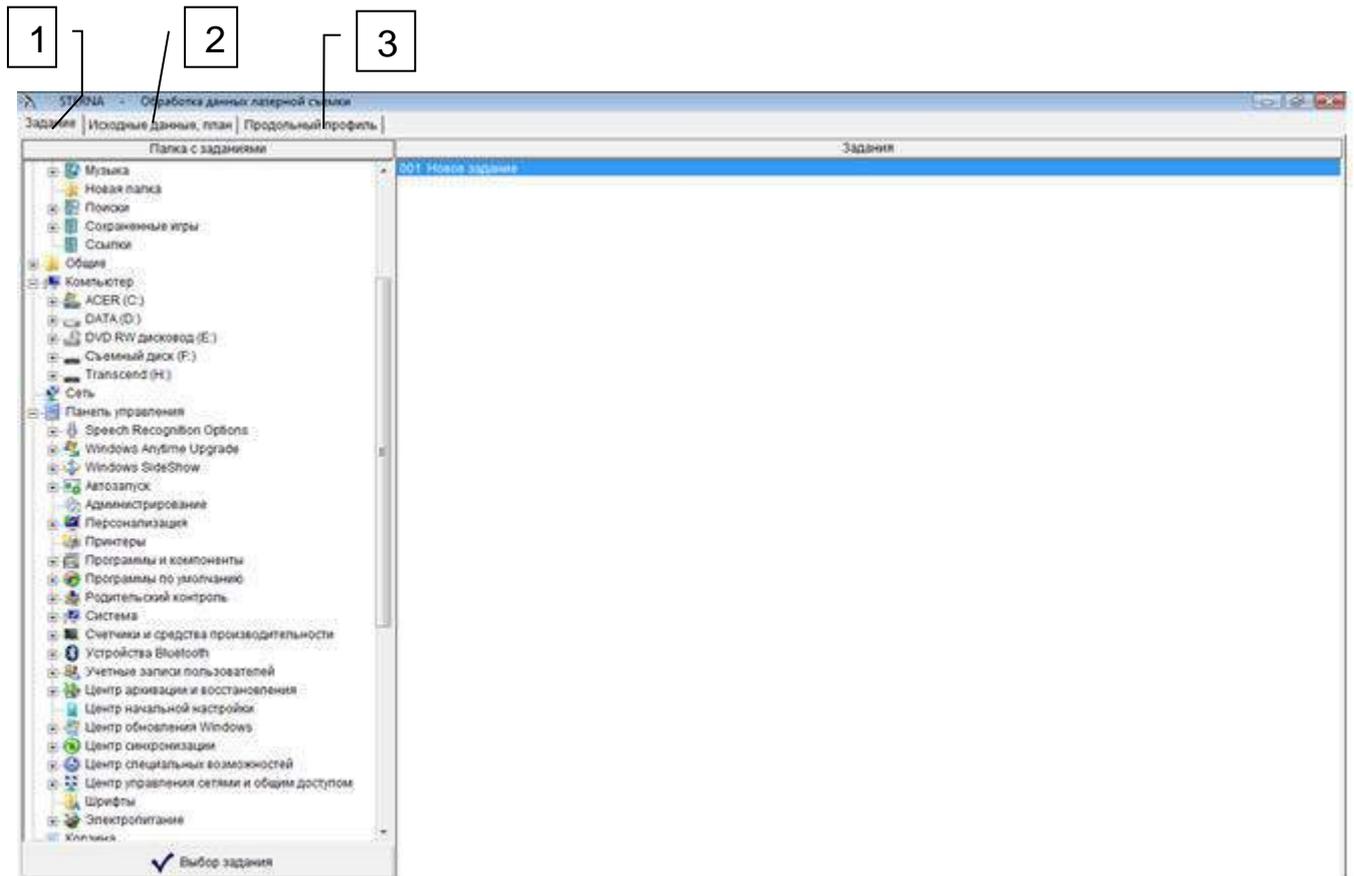


Рисунок 66 – Вкладка «Задание» главного окна **Sterna**

1 - Вкладка «Задание»;

2 - Вкладка «Исходные данные, план»;

3 – Вкладка «Продольный профиль».

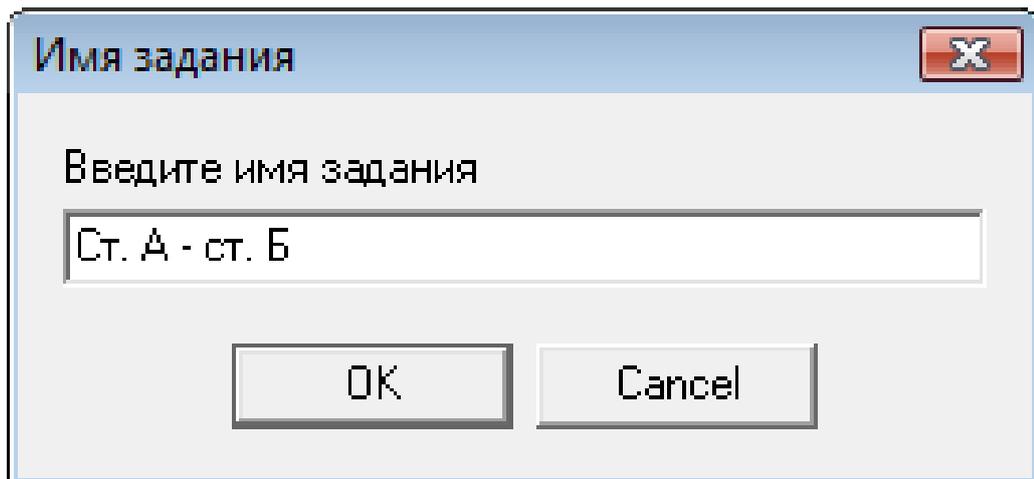


Рисунок 67 – Назначение имени задания

При выборе задания из списка существующих или создания нового задания пользователь автоматически переходит на вкладку «Исходные данные, план» (рисунок 68), которая содержит панель компонентов (рисунок

68 4 – 10, 15), панель вывода первой и последней строки исходных данных (рисунок 68, 11), панель вывода результатов (рисунок 68, 12) и поле вывода графической информации о плановом положении трассы, содержащее две вкладки: «График кривизны» (рисунок 68, 13) и «Координатная модель» (рисунок 68, 14). При вводе исходных данных о положении точек каждой рельсовой нити панель вывода первой и последней строки исходных данных заполнена полностью, если же вводятся точки оси пути, данные отображаются в колонке «Левая рельсовая нить или ось пути», соседняя колонка «Правая рельсовая нить» остается пустой. Панель «Расчётные координаты оси пути» остается пустой, а вкладка «Координатная модель» - неактивной вплоть до проведения расчета. На вкладке «График кривизны» отображается графическая интерпретация соответствующей зависимости, построенная по исходным данным.

Ввод исходных данных в задание осуществляется нажатием кнопки 4 (рисунок 68), предварительно распахивающееся боковое меню позволяет выбрать формат исходных данных (стандарт, формат тележки **Amberg** или другой) (рисунок 68а) и вызывает диалоговое окно «Чтение данных лазерного сканирования» (рисунок 68), в котором осуществляется выбор файла исходных данных.

Боковое вертикальное меню «Пикетаж:» (рисунок 68, 6, б) предлагает задать направление расчета пикетажа модели: по или против хода съемки соответственно. Распахивающийся список «Шаг, м» (рисунок 68, 8, в) предлагает выбрать регулярный шаг глобализации расчётных точек. При нажатии на стрелочку рядом с компонентом «Допуск, мм» (рисунок 68, 15, г) можно назначить предельный коридор отклонений координат расчётных точек от исходных.

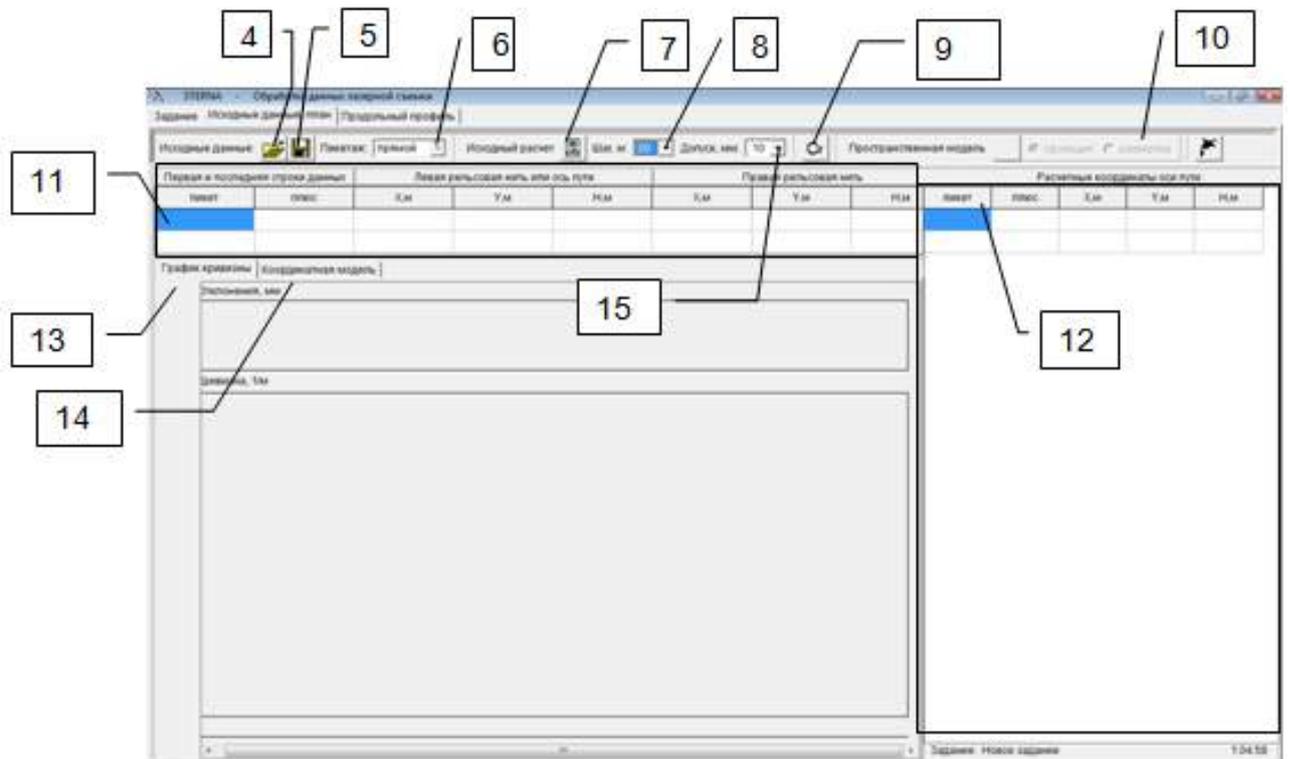


Рисунок 68 – Вкладка «Исходные данные, план» главного окна **Sterna**

а) вертикальное меню кнопки 4;

б) вертикальное меню кнопки 6;

в) вертикальное меню кнопки 8;

г) вертикальное меню кнопки 15;

4 – кнопка ввода исходных данных в задание;

5 – кнопка сохранения в задании произведенных изменений;

6 – кнопка выбора направления ведения пикетажа;

7 – кнопка расчёта задания;

8 – кнопка выбора шага регуляризации опорных точек модели оси пути;

9 – кнопка вывода на экран статистики обработки исходных данных;

10 – неактивная в данной версии панель выбора характера работы с исходными данными (по проекции или по развёртке трассы);

11 – панель вывода первой и последней строки исходных данных;

12 – панель вывода информации об опорных точках модели пути;

13 – панель отображения графика кривизны оси пути;

- 14 – панель отображения оси пути в координатах с разбитым пикетажем;
 15 – кнопка выбора допуска на отклонение точек модели от исходных данных.

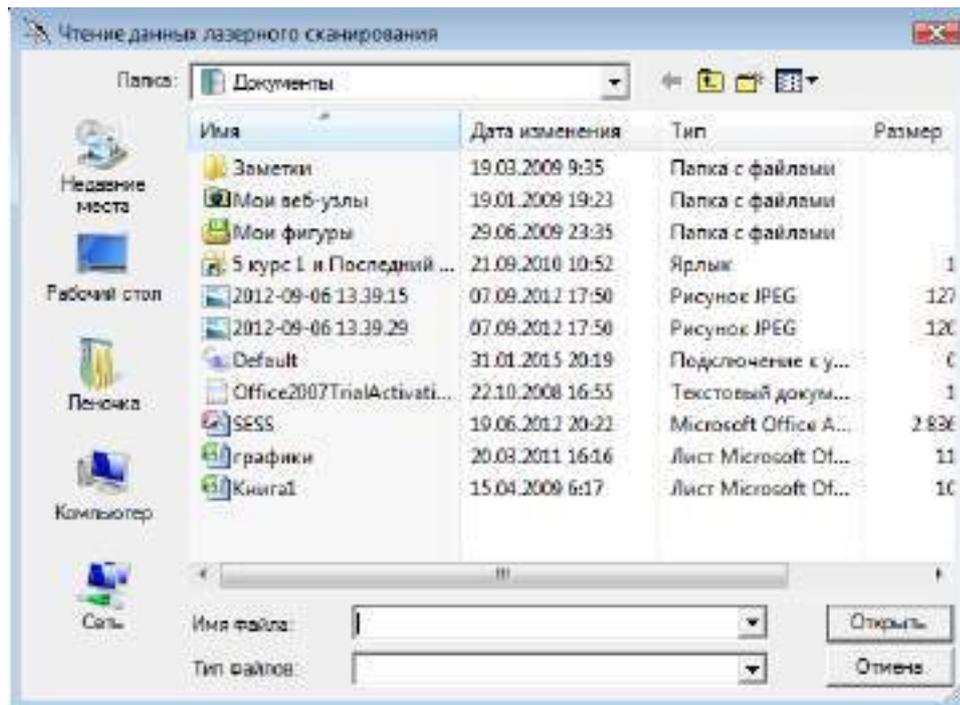


Рисунок 69 – Диалоговое окно «Чтение данных лазерного сканирования»

При чтении исходных данных возможно их попутное форматирование (рисунок 70) с целью установления границ столбцов данных, а также определение формата считываемых данных: ось пути или рельсовые нити; левая или правая рельсовая нить. В случае, проиллюстрированном рисунком 70, в качестве исходных данных задаются точки оси пути, запись их только в столбцах поля ввода «Левая рельсовая нить или ось пути» и нажатая радиокнопка «Заданы координаты оси пути» указывает на это.

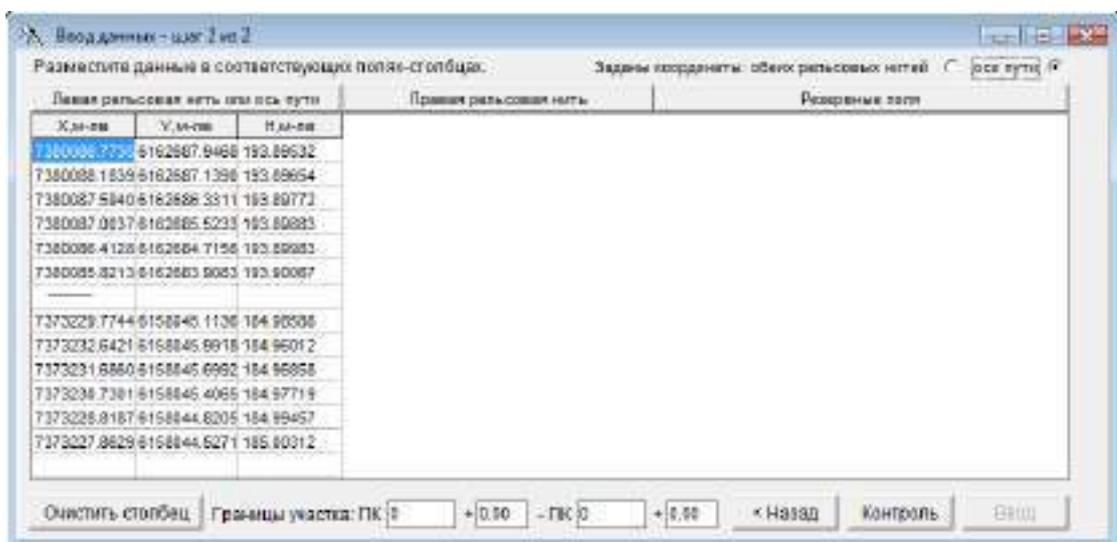


Рисунок 70 – Ввод исходных данных в задание

При нажатии кнопки «Ввод» окна «Ввод данных» на экран выводится вкладка «Исходные данные, план» главного окна формы **Sterna** с заполненной панелью 11 и отрисовывается график кривизны (рисунок 71). При нажатии кнопки вывода на экран статистики обработки исходных данных с пиктограммой  на панели расчетных координат оси пути появится информация о количестве введенных точек, среднем, минимальном и максимальном расстоянии между ними (рисунок 72).

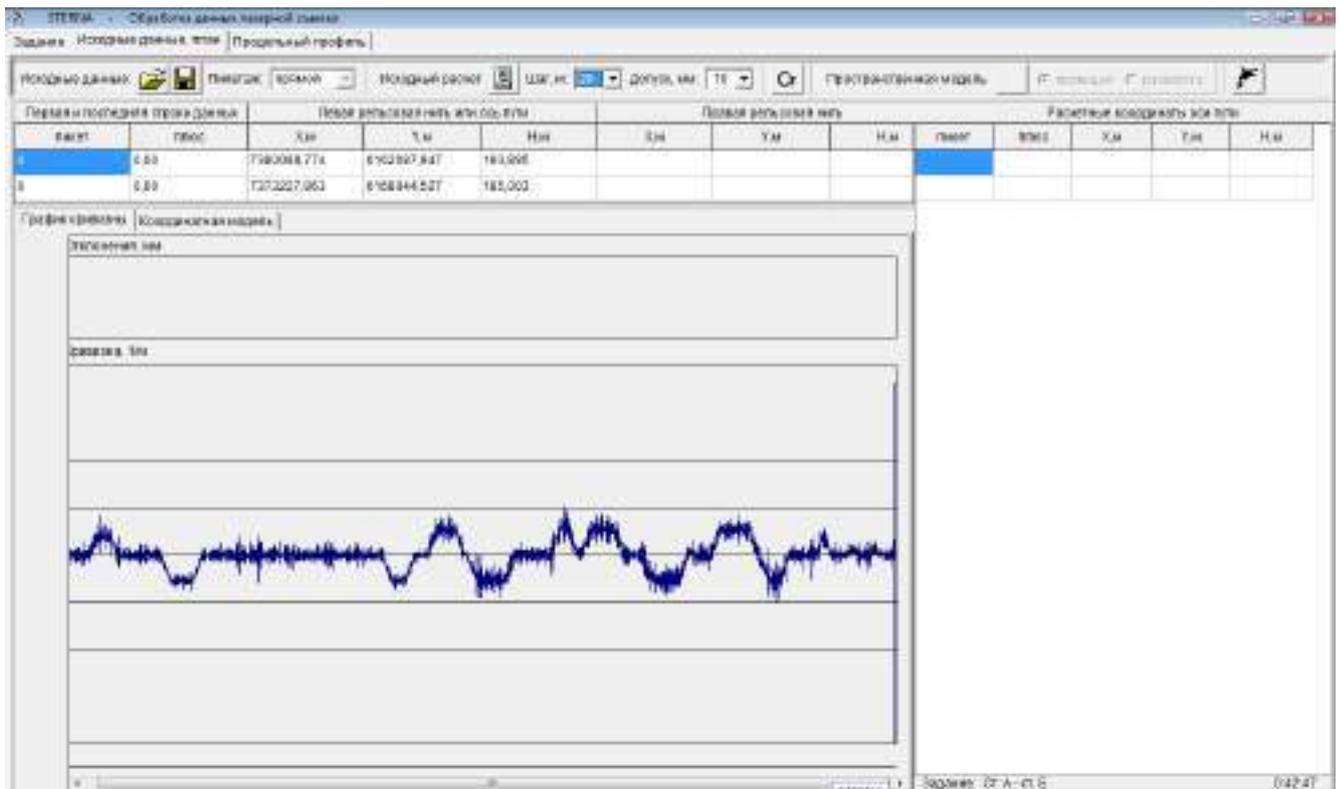


Рисунок 71 – График кривизны исходных данных

Статистика	
Число точек	11388
Расстояния между точками съемки:	
среднее, м	1,000
минимальное, м	0,959 № 11387
максимальное, м	6,999 № 8769
<input type="button" value="Закреть"/>	

Рисунок 72 – Панель статистики обработки исходных данных

Нажатие кнопки «Исходный расчет» с пиктограммой  приведет к вызову процедуры формирования модели оси пути, в результате чего на

экране появится график отклонений (отклонения рассчитываются в выбранном коридоре) и график кривизны, а также будет заполнена панель «Расчётные координаты оси пути» (рисунок 73). Для удобства пользователя по оси ординат графика кривизны указаны значения не кривизны, а радиуса кривой в метрах. При клике курсором по панели отображения графика кривизны появляется вертикальная красная линия и появляется всплывающая подсказка (рисунок 74) с указанием пикетажа рассматриваемой точки, радиусом кривой или пометкой «прямая» и величиной отклонения; на панели «Расчётные координаты оси пути» список координат точек оси пути пролистывается до рассматриваемой точки.

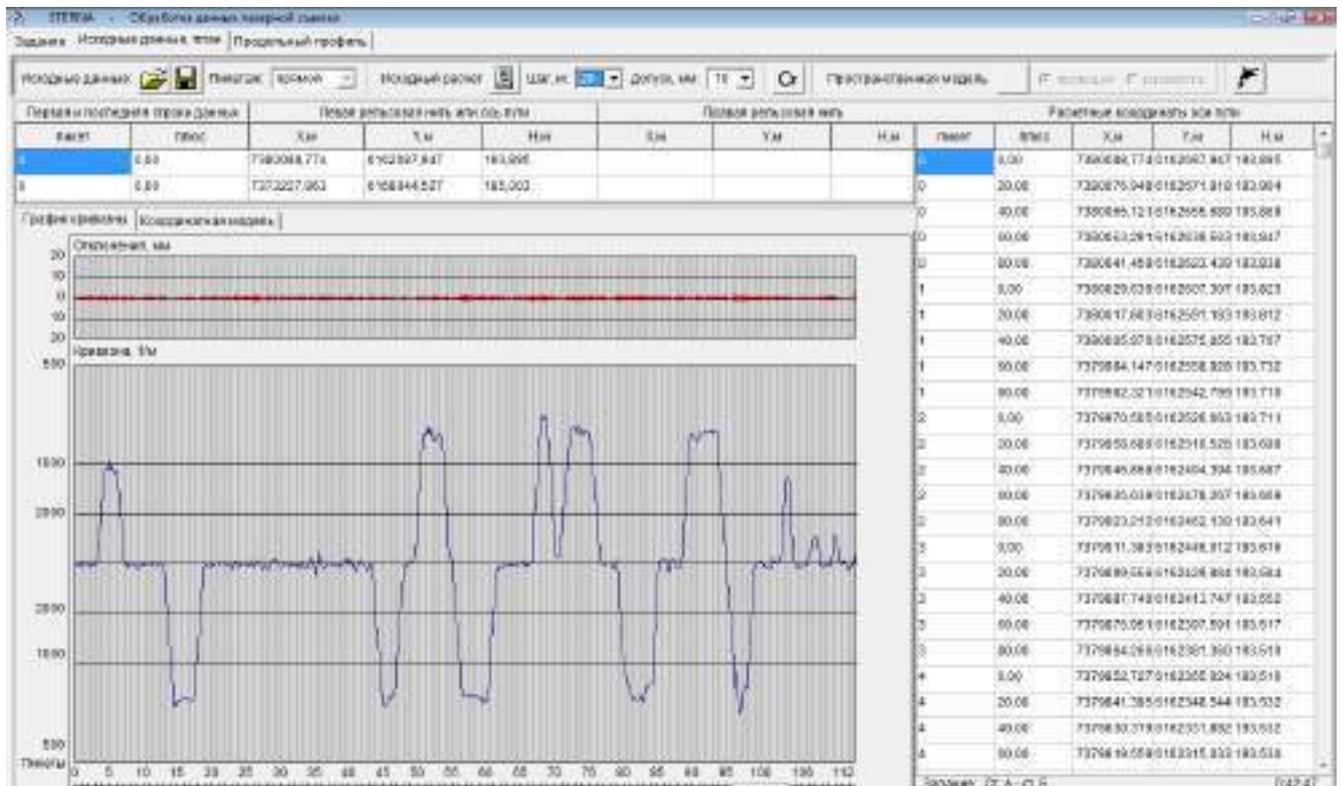


Рисунок 73 – Формирование модели оси пути

ПК 66 + 80,00 радиус: 2069 м отклонение: 1 мм

Рисунок 74 – Всплывающая подсказка

На вкладке «Координатная модель» отрисован план трассы пути с разбитым в выбранном направлении от выбранной точки пикетажем (рисунок 75).

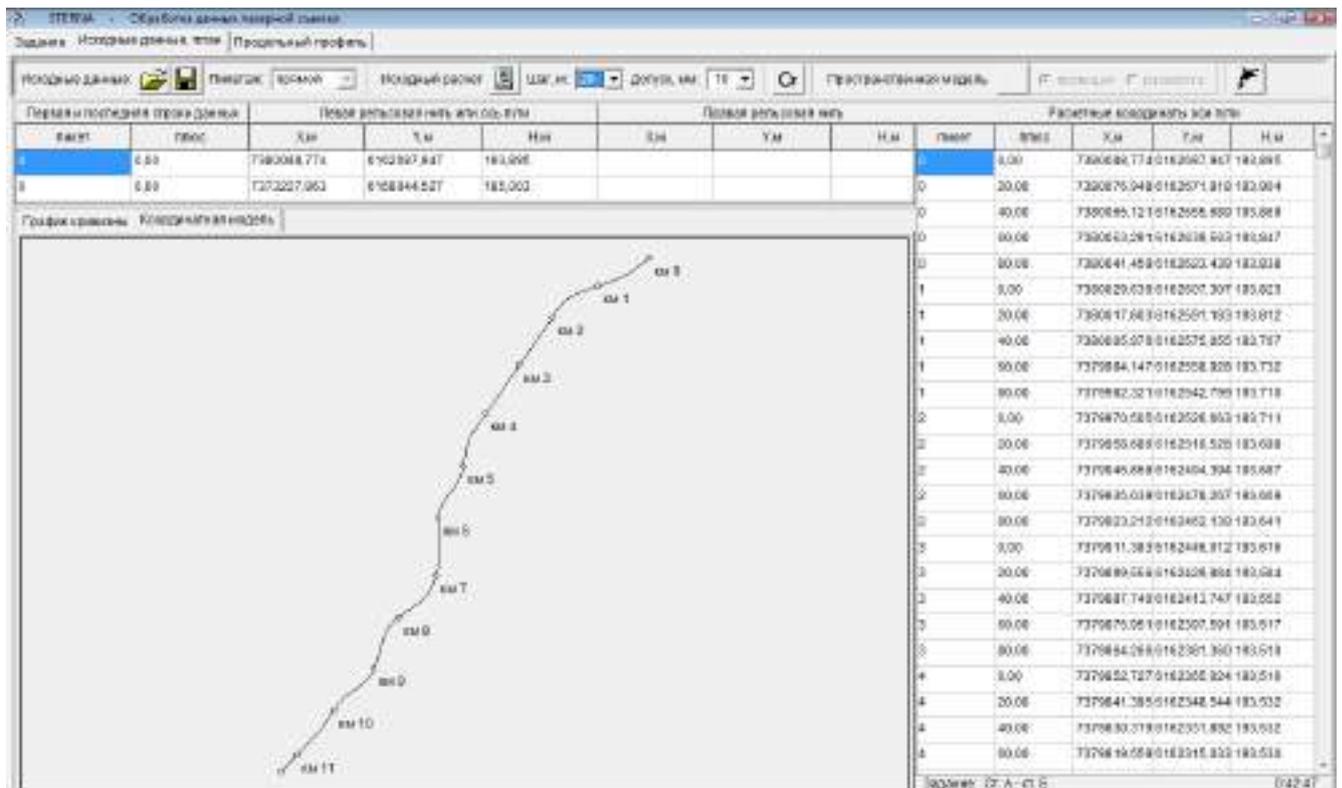


Рисунок 75 – Координатная модель оси пути

Вкладка «Продольный профиль» главного окна формы **Sterna** иллюстрирует продольный профиль, составленный по точкам съемки (рисунок 76). Нажатие кнопки  вызывает процедуру формирования продольного профиля модели оси пути (рисунок 77). При клике курсором по панели отображения продольного профиля появляется вертикальная красная линия и список координат точек оси пути пролистывается до рассматриваемой точки.

Расположенная в правом верхнем углу панели компонентов вкладки «Исходные данные, план» панель «Пространственная модель» в данной версии **Sterna** является неактивной. Планируется программная реализация процедуры, позволяющей учитывать пространственный характер трассы и разрабатывать ее модель в соответствии с выбранным подходом: план и профиль – это проекции или же развёртки на плоскости. Указанные типы моделей являются взаимно преобразуемыми.

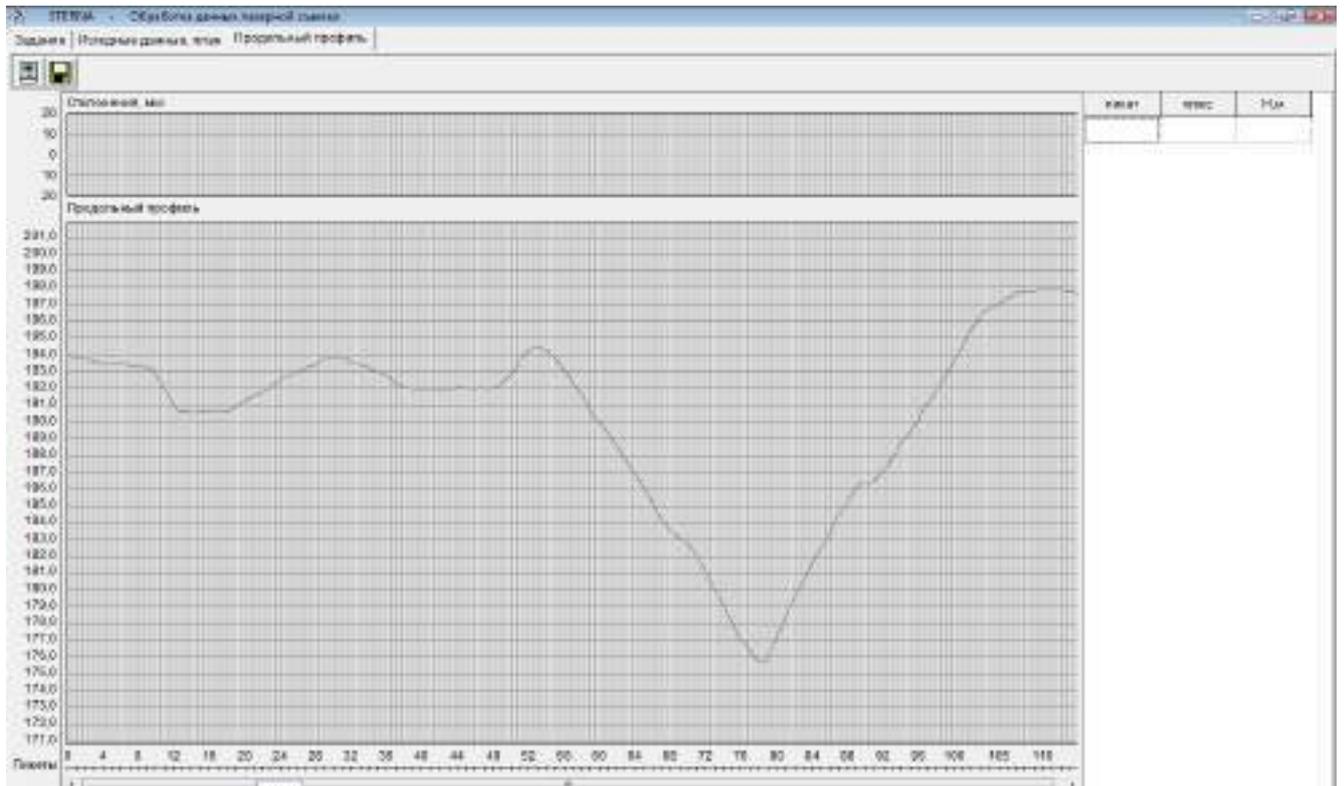


Рисунок 76 – Продольный профиль фактического положения оси пути

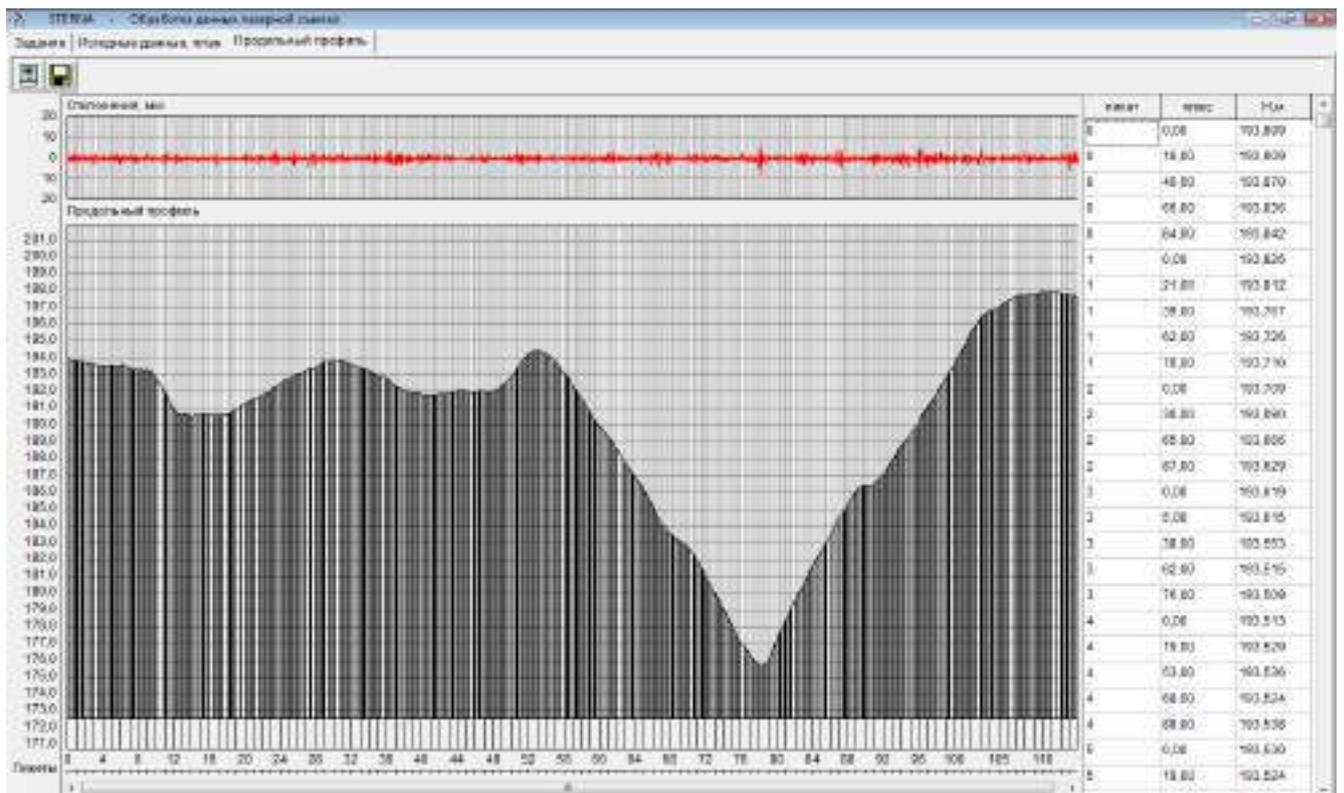


Рисунок 77 – Продольный профиль модели оси пути

Методика разработки таких моделей изложена в главе 2, п.2.3. Справа от панели «Пространственная модель» находится кнопка с пиктограммой



в данной версии концепта является неактивной. Планируется при нажатии кнопки вызов концепта **Orca**, функционал которого предполагает распознавание структуры плана. Методика этой составной части процесса проектирования реконструкции плана, реализованная в **Orca**, описана в главе 3, п.3.3.

4.4 Сравнение с существующими программными комплексами

Разработанные в ходе диссертационного исследования алгоритмы, послужившие основой концепта ПК **Sterna**, дают возможность вести речь о пространственном понимании трассы железнодорожного пути. Присутствующий в **Sterna** функционал позволяет рассматривать трассу в целом как пространственную линию, неотъемлемо работая с двумя ее плоскими проекциями: планом и профилем. Изложенный в диссертации материал предусматривает дальнейшую работу в направлении программной реализации методики высокоточного проектирования по развёрткам, а не искажающим реальное очертание проекциям трассы.

Аппарат регуляризации и глобализации исходных данных, реализованный в концепте ПК **Sterna**, позволяет из исходных данных различных типов генерировать регулярную модель с выбранным шагом, каждая точка которой является математическим ожиданием и по принципу наибольшего правдоподобия моделирует трассу пути.

Реализация вышеупомянутого функционала концепта ПК **Sterna** не может быть представлена к сравнению, поскольку на настоящий момент времени в известных ПК схожий функционал отсутствует.

4.5 Практическое применение

Sterna – единственное программное средство для создания регулярной модели плана существующего пути по данным мобильной роботизированной съемки, пригодной по составу и формату для расчета

параметров элементов плана имеющимися программными средствами. Максимальная длина участка была 500 км (500 000 точек).

Процесс работы с АСУ же иллюстрирует следующая схема: исходные данные роботизированной съемки (мобильного лазерного сканирования или полученные измерительными системами Amberg) подвергаются первичной обработке с помощью софта, прилагающегося к прибору, далее они обрабатываются в Sterna и преобразуются в математическую модель трассы пути. Полученные результаты (фактические данные) сравнивают с проектными данными и в ходе сравнения преобразуют в средство управления путевыми машинами в режиме реального времени.

Для сравнения фактического (полученной посредством Sterna модели) и проектного плана предполагается реализовать концепт Archer (рисунок 78).

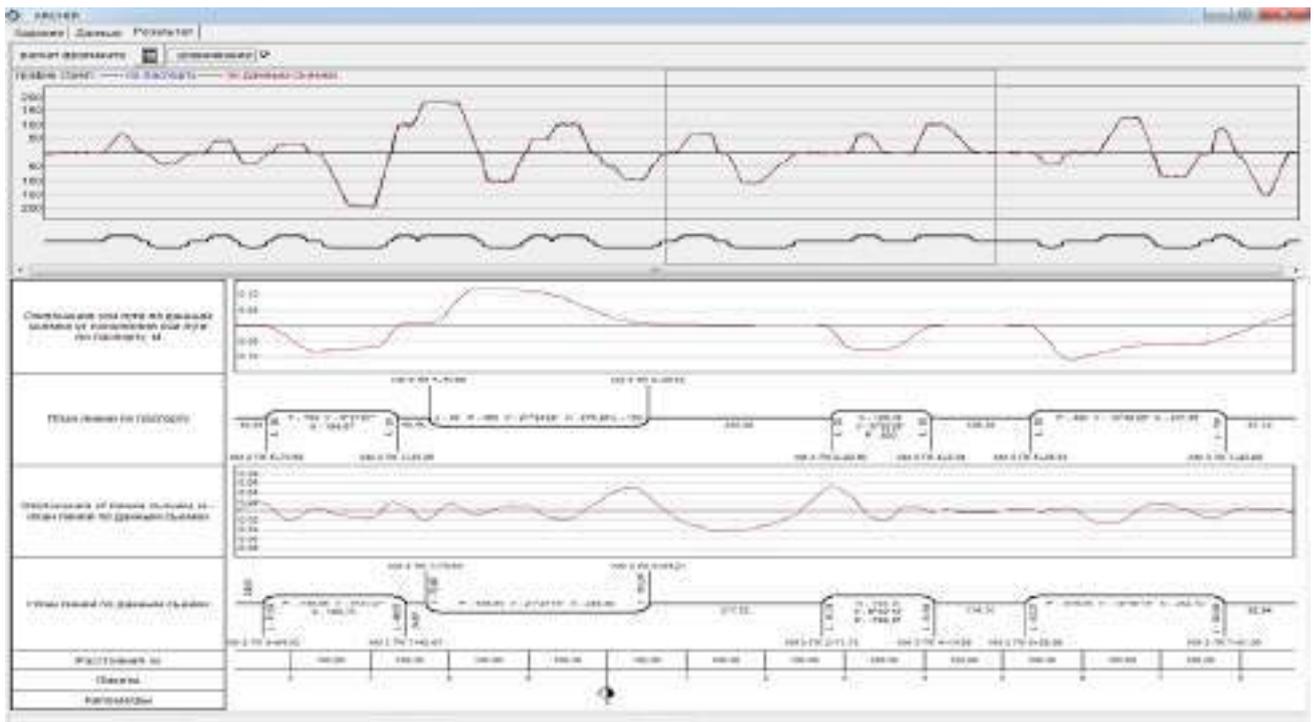


Рисунок 78 - Сравнение фактического и проектного плана – концепт Archer

На практике концепт **Sterna** использовался для разработки проектной документации по титулу «Реконструкция верхнего строения пути и дренажно-транспортной штольни Северомуйского тоннеля» и при расчете технико-экономического обоснования повышения скоростей движения на участке Чертково-Краснодар Северо-Кавказской железной дороги.

Основной целью использования **Sterna** в данном случае являлось уменьшение количества расчётных точек, не приводящее к снижению точности модели и компенсация погрешностей съёмки.

4.6 Выводы по четвертой главе

Для наглядности и достоверности разработанных в ходе диссертационного исследования методов был программно реализован демонстрационный концепт программного комплекса «**Sterna**». Концепт служит для преобразования исходных данных положения трассы железнодорожного пути, полученных в результате любого типа геодезической съёмки, в регулярную унифицированную пространственную модель трассы. Задачей исследования было дальнейшее применение этой модели для реконструкции плана, однако, возможности модели не ограничиваются этой задачей.

Схожего функционала в существующих программных комплексах, по крайней мере отечественных, на настоящий момент нет, поэтому сравнение осуществлялось только с фактическими данными, из чего удалось сделать вывод о достаточной правдоподобности моделирования.

Практическое применение результатов исследования осуществлялось для разработки проектной документации по ряду объектов, что позволило судить о состоятельности методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате исследования **впервые** получена единая пространственная математическая модель трассы железной дороги – трёхмерная линия, - потенциально применимая на всех этапах ее жизненного цикла.

2. Разработанная модель трассы железной дороги, основана на двух базовых определениях, отличных от традиционных: план трассы железной дороги- это развёртка (не проекция) трассы на горизонтальную плоскость. Такой подход обеспечивает:

- наиболее правдоподобное моделирование положения трассы в трёхмерном пространстве за счёт совпадения его представления на проектном и эксплуатационном этапах;
- ликвидацию проблемы несогласованности параметров элементов плана по очертанию, плановым координатам, углам поворота и длинам в проекции и в пространстве;
- высокую точность моделирования. Экспериментально установлено, что при шаге узлов регулярной модели плана трассы равном 10м, погрешность модели не превышает 1мм, достигая 1,5мм при моделировании переходной кривой длиной 20м при радиусе круговой кривой 200 м;

3. Применение разработанного метода моделирования для исходных данных мобильной лазерной съёмки позволило дополнить модель алгоритмами удаления ложных точек (экспериментально установлена доля таких точек - около 5%) и впервые, по крайней мере в российской практике, реализовать процесс генерации регулярной математической модели трассы железнодорожного пути (с наглядным для проектировщика шагом в 10 или 20м) из избыточного количества точек лазерного сканирования. Разработанная модель позволяет точно судить о положении любой точки трассы пути;

4. Программная реализация разработанной методики и алгоритмов работы с пространственной математической моделью плана трассы использовалась в проектах реконструкции ряда объектов, что позволило обеспечить содержание пути по проектным координатам с сохранением правильной геометрии очертания элементов плана при отклонениях фактического положения оси пути от проектного в пределах установленных допусков, составляющих ± 2 см.

В качестве перспективных направлений исследования планируется рассмотреть применение разработанной в ходе диссертационного исследования методики моделирования трассы для проектирования реконструкции продольного профиля и доработать метод распознавания структуры плана. Для проверки достоверности методов предполагается реализовать их программным путем и применить на практике, после чего сравнить результаты с фактическими данными.

Список сокращений и условных обозначений

<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>IMU</i>	<i>Inertial Measurement Unit</i> (инерциальный измерительный блок)
АВР	Автоматизация выправочных работ
АПР	Автоматизированное проектирование
АСУ	Автоматизированные системы управления
ВЛС	Воздушное лазерное сканирование
ГЛОНАСС	Глобальная Навигационная Спутниковая Система
ГОСТ	Государственный стандарт
ИТ	Информационная технология
КСПД ИЖТ	Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта
ЛЭП	Линии электропередач
МЛС	Мобильное лазерное сканирование
МНК	Метод наименьших квадратов
НЛС	Наземный лазерный сканер
ОАО «РЖД»	Открытое акционерное общество «Российские железные дороги»
ОС	Операционная система
ПК	Программный комплекс
ПО	Программное обеспечение
САПР	Системы автоматизированного проектирования
СГР	Отметка существующей головки рельса
ТЛО	Точки лазерного отражения
ЦММ	Цифровая модель местности
ЦМР	Цифровая модель рельефа
ЭВМ	Электронные вычислительные машины

Список литературы

1. Бучкин, В.А. Математические модели и методы в инженерных расчётах. Конспект лекций: учебное пособие /В.А. Бучкин, Е.А. Рыжик – М.: МИИТ, 2004.–76с.
2. Мамитко, А.А. Модель линии плана существующего железнодорожного пути, «Безопасность регионов – основа устойчивого развития», Материалы третьей международной научно-практической конференции, 12 сентября – 15 сентября 2012г. Иркутск: изд-во ИрГУПС, 2012.–С.264-270.
3. Корженевич, И.П. Математическая модель плана существующего железнодорожного пути / Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 15. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007.–271 с.
4. Винер, Н. Кибернетика и общество /Под.ред. Э.Я.Кольмана. - М.: Издательство иностранной литературы, 1958.–196 с.
5. История и философия науки / Под ред. Ю.В. Крянева, Л.Е. Моториной. – М.: Альфа-М, 2011.–414 с.
6. Некрасов, С.И. Философия науки и техники: тематический словарь-справочник. Учебное пособие / С.И. Некрасов, Н.А. Некрасова. – Орёл: ОГУ, 2010–289 с.
7. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: федер. закон Рос. Федерации от 27 июля 2006г. N 149-ФЗ: принят Гос. Думой 8 июля 2006г.: одобр. Советом Федерации 14 июля 2006г. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Бучкин, В.А. Сравнительный анализ программных комплексов / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова, Е.А. Рыжик /: М. Мир транспорта, №2, 2013.– С.112-121.

9. Проектирование автомобильной дороги городского типа в системе Credo ДОРОГИ. Практическое пособие, Минск: АНО ЦДО "КРЕДО-образование", 2010.–96 с.
10. Credo дороги 1.1 [Электронный ресурс], Кредо-Диалог. RU, 2012. – URL:http://www.credo-dialogue.com/software/list_programs/credo_dorogi.aspx, свободный, - Загл. с экрана (дата обращения: 23.03.2013).
11. Robur Топоматик. Железные дороги. Версия 3.0 [Электронный ресурс], С.Пб.: НПФ Топоматик. RU, 2009. – URL: <http://www.topomatic.ru/download/brochures/robur-rail>, свободный, – Загл. с экрана (дата обращения: 03.03.2013).
12. Bentley© Rail Track. Программа для проектирования и обслуживания инфраструктуры железнодорожного транспорта [Электронный ресурс], Bentley Systems, Inc., RU, 2012 – URL: http://ftp2.bentley.com/ist/collateral/docs/bentley_rail_track/bentley-rail-track_product-data-sheet_RU.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 17.12.2012).
13. Чешева, В.И. GeoniCS Желдор. Предложение компании CSoft для проектирования железных дорог / В.И. Чешева, С.В. Пархолуп /, – М.: CADmaster, №4, 2006.–С. 72-75.
14. Чешева, В.И. GeoniCS Piprofile – программа для эффективного и быстрого линейного проектирования / В.И. Чешева, Д.Н. Пожидаев /, – М.: CADmaster, №1, 2012.–С. 74-75.
15. GeoniCS Желдор [Электронный ресурс], Группа компаний CSoft, RU, 2013 – URL: <http://cad.elecran.com.ua/sapr/gis/geonics-jeldor>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 18.01.2013).
16. САПР КРП [Электронный ресурс], Росжелдорпроект-Иркутскжелдорпроект, RU, 2013 – URL: <http://www.kaprem.com>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2013).

17. CARD/1. Проектирование железных дорог [Электронный ресурс], A+C Консалт, RU, 2013 – URL: <http://www.card-1.ru/xslt.php?xml=card1&language=ru>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 30.03.2013).
18. Проектирование объектов инфраструктуры и дорог: AutoCAD Civil 3D. Официальный учебный курс [Электронный ресурс] / Autodesk, Inc. — М. : ДМК-Пресс, 2010 .— 561 с. : ил. — (САПР: от А до Я) .— ISBN 978-5-94074-614-0 .— URL: <https://rucont.ru/efd/199544> (дата обращения: 02.04.2013).
19. Середович, В.А. Н19 Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009.–261 с.
20. Mendenhall, S. Mobile laser scanning / S.Mendenhall // Civil+structural engineer [электронный ресурс] – URL: <http://www.cenews.com/article/8332/mobile-laser-scanning> (дата обращения 15.04.2014).
21. Фирма ООО «Г.Ф.К.»: официальный сайт//Каталог// Брошюра. URL: http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/railway/amberg_rail_ru_lowres.pdf (дата обращения: 20.07.2014).
22. Amberg technologies: official site / URL: <http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/rail-surveying/amberg-survey/> (дата обращения 21.11.2015).
23. Бучкин, В.А. Упорядочение данных координатной съемки железнодорожных путей. / В.А. Бучкин, К.И. Благоразумов / г. Ростов-на-Дону: Вестник РГУПС, №1, 2008.–С. 136-140.
24. Бучкин, В.А., Лисицын И.М. «Перспективы развития технологий укрупненного проектирования объектов строительства» - Материалы IX Международной научно-практической конференции / В.А. Бучкин, И.М. Лисицын/ *Vedecky Prumysl Evropskeho Kontinentu* – 2013; *Praha, Publishing House «Education and Science» s.r.o.*, 2013–С.47-51.

25. СТО Газпром 2-3.5-051-2006 Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов: дата введения 03 марта 2007г / г. Челябинск: Центр безопасности труда, 2006.
26. Карпик, А.П. Теория моделирования пространственной длины трассы / А.П. Карпик, А.В. Никитин / Интерэкспо Геосибирь, №1 / Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2013– С.49-53.
27. Турбин, И.В. Изыскания и проектирование железных дорог. Учебник для вузов ж.-д. трансп. / И.В. Турбин, А.В. Гавриленков, И.И. Кантор и др. Под ред. И.В. Турбина. – М.: Транспорт, 1989.–479 с.
28. Горинов, А.В. Изыскания и проектирование железных дорог [Текст] : Учебник для высш. учеб. заведений ж.-д. транспорта / А.В. Горинов, И.И. Кантор, Кондраченко, И.В. Турбин. - 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Транспорт, 1979. – Т.2.–343 с.
29. Изыскания и проектирование железных дорог. 1 [Текст] / [Под ред. проф.-орденоносца К. А. Оппенгейма, заслуж. деятеля науки и техники]. – М.: Трансжелдориздат, 1938. - 1 т.; 26 см. - (Изыскания, проектирование и постройка железных дорог/ СССР - НКПС. Центр. упр. учеб. заведениями; Т. 1–291с.
30. Бучкин, В.А. Моделирование трассы пути как пространственного объекта / В.А. Бучкин, А.А. Воронков, Е.П. Ленченкова – М.: Путь и путевое хозяйство, №7, 2015.–С.31-34.
31. Бучкин, В.А. Параметрическая пространственная модель трассы железнодорожного пути / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова /: Ростов-на-Дону Вестник РГУПС, №1(57), 2015. С. 99-103.
32. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути / М.: ОАО РЖД, утверждены 02.05.2012. – 309 с.
33. Бучкин, В.А. Пространственная модель трассы железнодорожного пути / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова / Безопасность регионов – основа

- устойчивого развития: Материалы четвертой международной научно-практической конференции, 22 – 26 сентября 2014 г. Иркутск: Изд-во Иркутск: ИрГУПС, 2014. – С.264-270.
34. Эконометрика. Учебник / Под ред. Елисейевой И. И. — 2-е изд. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 576 с. — ISBN 5-279-02786-3
35. Bullock, R. Least-squares circle fit / Developmental testbed center – С. 1-3 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://dtcenter.org/met/users/docs/write_ups/circle_fit.pdf
36. Левчук, Г.П. Прикладная геодезия: основные методы и принципы инженерно-геодезических работ. Учебник для вузов. – М.: Недра 1981– С.131-132.
37. Распоряжение старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича от 20 апреля 2012г. № 802р «О создании и эксплуатации высокоточной координатной системы ОАО «РЖД».
38. Распоряжение президента ОАО «РЖД» В.И. Якунина от 03 декабря 2010г. №2511р «О создании комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта».
39. Техничко-экономические изыскания при проектировании железных дорог [Текст] : учебное пособие / [С. В. Шкурников и др.] ; Федеральное агентство ж.-д. трансп., Федеральное агентство ж.-д. трансп., Федеральное бюджетное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Петербургский гос. ун-т путей сообщ.". - Санкт-Петербург : ПГУПС, 2013. - 62, [1] с. : ил.; 20 см.;
40. Кантор, И.И. Изыскания и проектирование железных дорог. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003.–288с.
41. Свод правил СП 119.13330.2012. Железные дороги колеи 1520мм / М.: Минстрой России, 2015. – 161 с.
42. Рыжик, Е.А. Компьютерное моделирование: Конспект лекций. – М.: МИИТ, 2015.–148 с.

43. Дюнин, А.К. Вопросы теории проектирования железнодорожных кривых / Дюнин А.К., Д.Г. Ковтун, В.И Ангелейко. / Новосибирск: Издательство Сибирского отделения АН СССР, 1960.–175 с.
44. План поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства и проектирования : приказ министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 29.12.2014 г. № 926 / пр. – 3 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/383/prikaz-926pr.pdf> (дата обращения 21.01.2015).
45. Положение по оценке параметров устройства кривых участков пути вагонами путеизмерителями, расчету параметров устройства кривых для их паспортизации. ЦПТ-46/2 / М.: ОАО РЖД, утверждено 19.03.2009. - 43 с.
46. Аккерман, Г.Л. Биклотоидное проектирование криволинейных участков железной дороги./ Г.Л. Аккерман , С.Г. Аккерман , О.А. Кравченко / Путь и путевое хозяйство: научно -популярный, производственно -технический журнал. - 2010. -№10.–С.28 -30.
47. Ревва, П.С. Технология наземного лазерного сканирования для реконструкции объекта транспортной инфраструктуры / П.С. Ревва, А.В. Соколов, Ю.А. Ткаченко, В.С. Шварцфельд / Проектирование развития региональной сети железных дорог: сборник научных трудов. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения. - №1 – 2013.–С. 88-94.
48. Дюнин, А.К. Аналитический метод проектирования переустройства железнодорожного пути в плане/ А.К. Дюнин, А.И. Проценко - Новосибирск: Транспорт, 1967, - 225 с.
49. Бучкин, В.А. Методология автоматизированного проектирования реконструкции плана и профиля железных дорог/ Диссертация на

соискание ученой степени доктора технических наук, М.: МИИТ, 2001.

50. Бучкин, В.А. Цифровые технологии инженерных изысканий: конспект лекций / В.А. Бучкин, Е.А. Рыжик. – М.: МИИТ, 2014. – 56 с.
51. ГОСТ 15971-90 Системы обработки информации. Термины и определения, М.: Издательство стандартов / Утвержден Постановлением Государственного комитета ССр по управлению качеством продукции и стандартам от 26.10.1990 №2698. – 1990.–14 с.