

На правах рукописи



**Кузнецов Александр Игоревич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ ОПОЛЗНЯ  
ПО ДАННЫМ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет по землеустройству».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Баранов Владимир Николаевич.**

**Официальные оппоненты:** **Клюшин Евгений Борисович**  
доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра прикладной геодезии, профессор;

**Писаренко Владимир Кондратьевич**  
кандидат технических наук, доцент, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства, кафедра геодезии, заведующий кафедрой

**Ведущая организация:** ФГУП Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъёмки и картографии им. Ф.Н. Красовского.

Защита состоится 28 марта 2013 года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский переулок, д. 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК.

Автореферат разослан 26 февраля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Климков  
Юрий Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Развитие городов и сельских населённых пунктов сопровождается хозяйственным освоением новых территорий, включая площади, поражённые оползневыми процессами. Эффективное использование таких земель требует изучения геометрии и динамики оползней в рамках инженерных изысканий.

Важной геометрической характеристикой оползневого тела является его высота (глубина) – разность высот поверхности земли и подстилающей поверхности, называемой далее поверхностью скольжения оползня (ПСО). Информация о ПСО имеет большое значение для понимания строения оползня, его геологической истории и перспективы развития. Сведения о глубине оползня участвуют в оценке устойчивости склона и оползневого давления. Они необходимы при организации противооползневой защиты территории и оценке её эффективности. Так же высоты поверхности скольжения нужно знать для обхода оползневого тела при проходке тоннелей и коллекторов. Ошибки в определении высот ПСО либо необоснованно удорожают проекты, либо способствуют авариям после их осуществления (разрыв коммуникаций, разрушение подпорных стенок и т.п.).

Задача определения формы ПСО входит в состав инженерно-геодезических изысканий, однако в настоящее время ею занимаются главным образом геологи на основе проходки горных выработок. Серьёзным недостатком такого подхода является высокая стоимость буровых (земляных) работ. При этом точность определения глубины ПСО редко превышает 1 метр, что является худшим показателем среди других геометрических и кинематических характеристик оползня. В этой связи требуется разработка новых точных и экономичных методов определения формы ПСО для повышения эффективности инженерных изысканий на оползневых склонах.

**Объект и предмет исследования** – объектом является оползневое тело, предметом – поверхность скольжения оползня (ПСО).

**Цель работы** – разработка метода определения высот ПСО по данным геодезического мониторинга.

### **Основные задачи исследования:**

- 1) анализ проблемы на основе опубликованных материалов;
- 2) разработка теории метода определения высот ПСО по данным геодезического мониторинга;
- 3) разработка методики косвенного измерения высот ПСО.

**Методы исследований:** математический анализ, аналитическая геометрия, теория ошибок измерений, статистический анализ, натурный эксперимент.

**Научная новизна работы.** Разработан и внедрён метод определения высот ПСО по данным наземного геодезического мониторинга.

**Практическая ценность работы.** На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика косвенного измерения высот ПСО глубоких оползней скольжения и выдавливания с необходимой для решения инженерных задач точностью.

### **На защиту выносятся следующие научные результаты:**

- 1) расчётный метод определения высот ПСО по результатам геодезического мониторинга земной поверхности: исходные постулаты, алгоритмы обработки данных, оценка точности входных и выходных данных;
- 2) методика измерения высот ПСО на основе геодезического мониторинга.

**Публикации и апробация работы.** Результаты диссертационных исследований доложены на общероссийских и международных конференциях: GEOFORM (Москва, 2009), ГУЗ (Москва, 2009 [3], 2010 [5]), МИИГАиК (Москва, 2010), ПНИИИС (Москва, 2009 [2], 2010 [4], 2011 [9]).

По оползневой тематике опубликовано 9 статей, из них три [6-8] – в рецензируемых журналах ВАК. Результаты внедрены в производство ООО «Экостроймониторинг» [9] и использованы в учебном процессе на кафедре Геодезии и геоинформатики ГУЗ.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и библиографического списка. Общий объём диссертации составляет 168 страниц, в том числе 34 рисунка, 3 таблицы и 5 приложений (35 страниц). Библиографический список содержит 71 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Первая глава «Основания для изучения поверхности скольжения оползня (ПСО) по векторам смещений деформационных пунктов»

посвящена постановке задачи диссертационного исследования.

Объектом исследования является оползневое тело. В диссертации приводятся классификации оползневых процессов: по структуре оползневого тела и ПСО (асеквентные, инсеквентные и консеквентные), по механизму смещения пород (оползни сдвига, выдавливания, вязкопластические...), по стадии процесса (подготовка смещения, основное смещение, временная стабилизация...). Циклический характер большинства оползневых процессов влияет на способы их познания, предполагая широкое использование мониторинга.

Предметом диссертационного исследования является геометрия ПСО – нижней границы между смещающимися и неподвижными породами. В работе приводится обзор возможностей существующих методов изучения ПСО и даны сведения об их точности. Установлено, что в обычной практике инженерных изысканий достаточная точность определения высот ПСО составляет 1 м.

*В основу геодезического метода определения ПСО, рассматриваемого в диссертации, положена гипотеза о параллельности вектора смещения пункта, расположенного на поверхности земли, и касательной к ПСО в соответствующей точке (рисунок 1). Оползневое тело считается недеформируемым, смещающимся по одной поверхности скольжения. Деформационные пункты принимаются идеальными индикаторами оползневого смещения, а характер изменения кривизны ПСО между ними считается известным.*

На базе этих постулатов советскими учёными было предложено несколько алгоритмов построения ПСО по данным геодезического мониторинга: Г.Л. Фисенко (1956), И.О. Тихвинский (1977), Г.И. Лебедь (1980). Эти алгоритмы, используя приближённый графический путь решения, не удовлетворяли метрологическому требованию Единства измерений, т.к. не предусматривали полноценной оценки точности результатов (отсутствовала связь между точностью

входных и выходных данных). Этот недостаток стал препятствием к широкому распространению метода изучения ПСО по векторам смещений пунктов.

В заключение главы приводится оценка целесообразности разработки нового геодезического метода для изучения геометрии ПСО. Основными его преимуществами признаны системность и экономичность, а основными проблемами, требующими решения – недостаточная теоретическая база и отсутствие методического обеспечения. *Учитывая достоинства идеи, автор счёл необходимым разработку метода определения высот ПСО по векторам смещений деформационных пунктов и методики его применения.*

**Во второй главе «Основы теории метода определения высот ПСО по векторам смещений пунктов»** даны основные понятия и выведены формулы для оценки случайной погрешности метода.

При определении высот ПСО по векторам смещений пунктов реализуется *тригонометрический принцип* – превышение  $h_{k-(k+1)}$  находят через угол наклона  $v_{k-(k+1)}^{cp}$  хорды  $k-(k+1)$  и расстояние между точками  $S_{k-(k+1)}$  (рисунок 1).

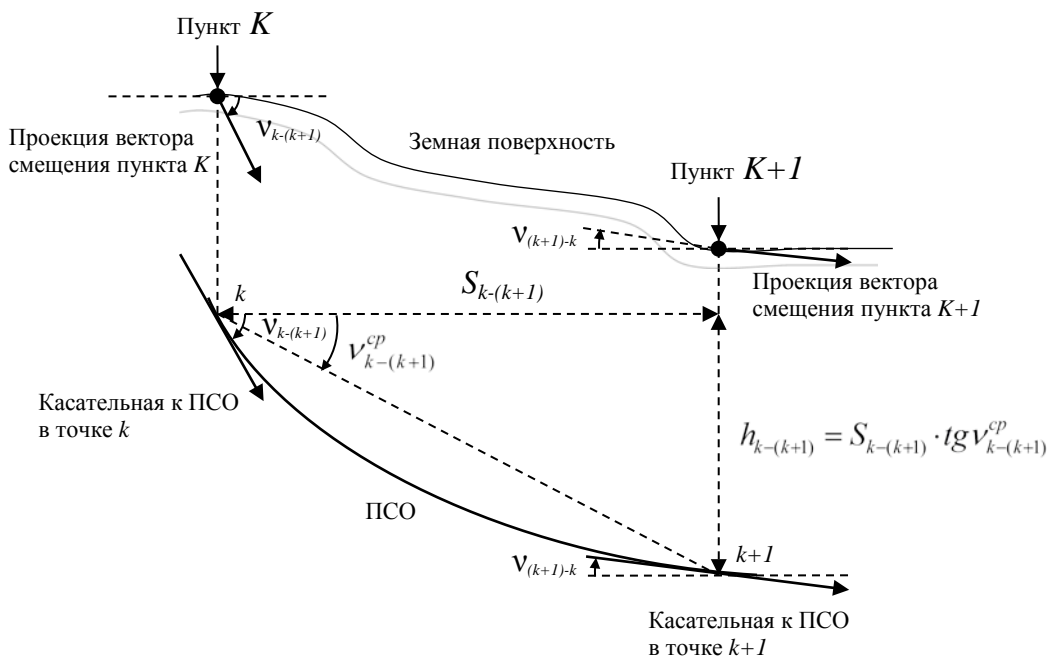


Рисунок 1 – Вертикальный разрез оползня по линии K-(K+1)

Способ вычисления тангенса угла наклона хорды зависит от исходной модели линии скольжения. Основанием для выбора модели является тип оползня и

качество используемой геодезической информации. Если принять модель ПСО в виде *дуги окружности*, предполагая линейное изменение наклона ПСО (асеквентные оползни сдвига или низкая достоверность измерений), получим:

$$h_{k-(k+1)}^{о\kappa\pi} = S_{k-(k+1)} \tan \frac{v_{k-(k+1)} - v_{(k+1)-k}}{2} = S_{k-(k+1)} \tan \left[ \frac{v_k \cos(\alpha_{k-(k+1)} - \alpha_k^m)}{2 \cos(\alpha_k - \alpha_k^m)} + \frac{v_{k+1} \cos(\alpha_{k-(k+1)} - \alpha_{k+1}^m)}{2 \cos(\alpha_{k+1} - \alpha_{k+1}^m)} \right], \quad (1)$$

где  $\alpha_{k-(k+1)}$ ,  $S_{k-(k+1)}$  – дирекционный угол и горизонтальное проложение линии;

$v_k, v_{k+1}$  – углы наклона векторов смещения в соответствующих точках;

$\alpha_k^m, \alpha_{k+1}^m$  – дирекционные углы максимального наклона ПСО;

$v_{k-(k+1)}$  – угол наклона проекции вектора смещения  $K$  на створ  $K-(K+1)$ ;

$v_{(k+1)-k}$  – угол наклона проекции вектора смещения  $K+1$  на створ  $(K+1)-K$  (рисунок 1).

Если считать линию скольжения *параболой* (оползни выдавливания), то:

$$h_{k-(k+1)}^{параб} = S_{k-(k+1)} \frac{\tan v_{k-(k+1)} - \tan v_{(k+1)-k}}{2} = \frac{S_{k-(k+1)}}{2} \left[ \frac{i_k \cos(\alpha_{k-(k+1)} - \alpha_k^m)}{\cos(\alpha_k - \alpha_k^m)} + \frac{i_{k+1} \cos(\alpha_{k-(k+1)} - \alpha_{k+1}^m)}{\cos(\alpha_{k+1} - \alpha_{k+1}^m)} \right], \quad (2)$$

где  $i_k, i_{k+1}$  – уклоны векторов смещения.

Необходимость учёта  $\alpha^m$  возникает в связи с проектированием векторов смещений на направление нивелирования. Параметр  $\alpha^m$  соотносится с направлением падения мезорельефа оползня и определяется по горизонталям топографического плана.

Если в направлении смещения построить профиль по нескольким деформационным пунктам и знать высоту ПСО в одном из них  $H_{исх}$ , то можно найти высоты других точек поверхности скольжения:

$$H_k = H_{исх} + [h], \quad (3)$$

где  $H_k$  – высота определяемой точки  $k$  на поверхности скольжения;

$[h]$  – сумма превышений по ПСО от исходной точки до определяемой.

Метод получения высот ПСО по результатам геодинамических измерений (векторам смещений пунктов) обладает следующей особенностью – поверх-

ность скольжения можно определить только у движущегося объекта. Поэтому в качестве краткого названия автором диссертации предложен термин *динамическое нивелирование*, наилучшим образом отражающий сущность метода.

На основе выражения (2) в диссертации выведена формула для суммы превышений  $[h]$  в ходе динамического нивелирования:

$$[h] \approx \sum_{k=1}^r \frac{\Delta X_{(k-1)-(k+1)}^m}{2} i_k^m = \sum_{k=1}^r h_k, \quad (4)$$

где  $k, r$  – порядковый номер и число пунктов в ходе;  $\Delta X_{(k-1)-(k+1)}^m$  – проекция линии  $(k-1)-(k+1)$  на направление максимального наклона ПСО в точке  $k$ ;  $i_k^m$  – максимальный уклон ПСО в точке  $k$ ;  $h_k$  – превышение на ПСО (рисунок 2:  $h_1, h_2, h_3$ ).

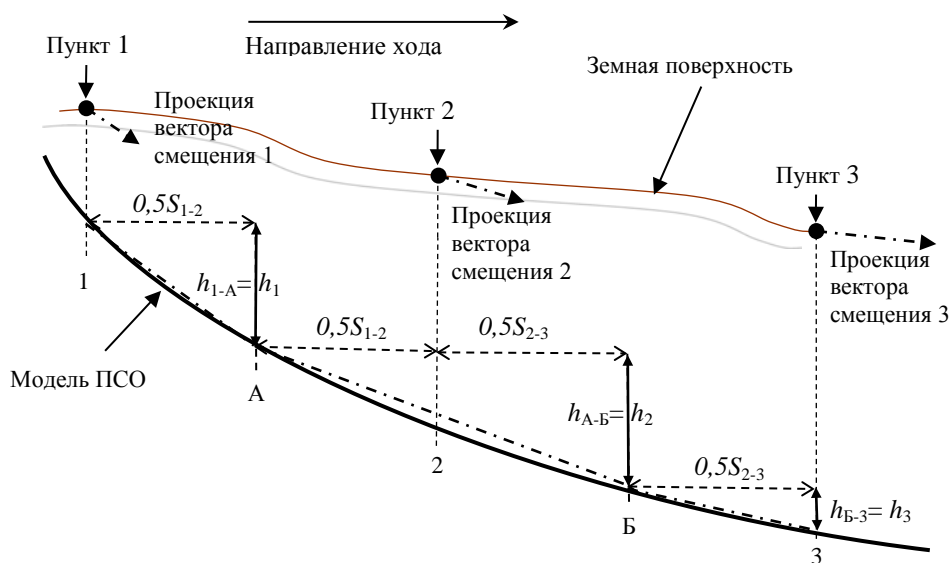


Рисунок 2 – Ход динамического нивелирования в разрезе

На рисунке 2 проекции векторов смещений 1, 2 и 3 на линию хода параллельны соответствующим хордам 1-А, А-Б, Б-3, а слагаемые  $h_k$  суммы (4) соответствуют превышениям на поверхности скольжения  $h_{1-A}, h_{A-B}, h_{B-3}$ .

Найдём СКП функции (4):

$$m_{[h]} = \sqrt{\sum_{k=1}^r \left( \frac{\Delta X_{(k-1)-(k+1)}^m}{2} m_{i_k^m} \right)^2}. \quad (5)$$



В диссертации выведены формулы, выражающие СКП максимального уклона ПСО  $m_{i_k^m}$  через группы параметров:  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \alpha^m$  или  $i, \varepsilon, \alpha^m$ . Во втором случае имеем:

$$m_{i_k^m}^2 = \frac{m_{i_k}^2 + \left( \frac{\operatorname{tg}(\alpha_k - \alpha_k^m)}{1 + \varepsilon^2} i_k m_{\varepsilon_k} \right)^2 + \left( \operatorname{tg}(\alpha_{(k-1)-(k+1)} - \alpha_k^m) - \operatorname{tg}(\alpha_k - \alpha_k^m) \right) i_k m_{\alpha^m}^2}{\cos^2(\alpha_k - \alpha_k^m)}, \quad (6)$$

где  $\alpha_k, \alpha_k^m$  – дирекционные углы в точке  $k$  вектора смещения и направления максимального наклона ПСО;  $\alpha_{(k-1)-(k+1)}$  – дирекционный угол линии (K-1)-(K+1);  $i_k = \tan \nu_k$  и  $\varepsilon_k = \operatorname{tg} \alpha_k$  – уклон и тангенс дирекционного угла вектора смещения;  $m_{i_k}, m_{\varepsilon_k}, m_{\alpha^m}$  – СКП соответствующих параметров.

Применительно к продольным профилям, когда линия (K-1)-(K+1) совпадает с направлением смещения пунктов,  $\alpha_{k-(k+1)} \approx \alpha_k \approx \alpha_{k+1}$ , формула (5) примет вид:

$$m_{[h]} = \sqrt{\sum_{k=1}^r \left( \frac{S_{(k-1)-(k+1)}}{2} m_{i_k} \right)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^r (S_k^{\text{cp}} m_{i_k})^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^r \left( \frac{S_k^{\text{cp}}}{s_k} \right)^2 (i_k^2 m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta z}^2)}, \quad (7)$$

где  $S_{(k-1)-(k+1)}$  – расстояние между соответствующими пунктами профиля;  $S_k^{\text{cp}}$  – средний шаг профиля в районе пункта К;  $s_k$  – горизонтальное проложение вектора смещения на пункте К;  $m_{i_k}$  – СКП уклона вектора смещения пункта К;  $m_{\Delta x}, m_{\Delta z}$  – СКП измеренных плановых и высотных смещений.

Для *априорной* оценки точности профильных сетей динамического нивелирования упростим формулу (7). Допуская равенство погрешностей одного превышения  $S_k^{\text{cp}} m_{i_k} = m_h - \text{const}$ , получим:

$$m_{[h]} = \sqrt{\sum_{k=1}^r (S_k^{\text{cp}} m_{i_k})^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^r m_h^2} = m_h \sqrt{r}, \quad (8)$$

где  $m_h$  – СКП одного превышения;  $r$  – число пунктов в ходе (профиле).

Для *априорной* оценки точности площадных сетей динамического нивелирования (пункты произвольно распределены по территории оползня) из формулы (5), приняв  $\alpha_k = \alpha_k^m$ , получим СКП превышения в ходе  $m_{[h]}$ :

$$m_{[h]} = \sqrt{\sum_{k=1}^r \left( \frac{\Delta X_{(k-1)-(k+1)}^m}{2} m_{i_k} \right)^2} \approx \Delta X_{cp}^m m_{i_{cp}} \sqrt{r}, \quad (9)$$

где  $m_{i_k}$ ,  $m_{i_{cp}}$  - СКП уклона вектора смещения  $k$  и среднее на объекте;  $\Delta X_{cp}^m$  - среднее приращение абсцисс между смежными пунктами сети в оползневой системе координат (ось  $X^m$  совпадает с направлением смещения оползня); остальные обозначения – см. формулу (4).

Для *постановки динамического нивелирования необходимо определить плотность сети на разных участках оползня и продолжительность мониторинга*. Задавшись погрешностью одного превышения  $m_h$  и погрешностью уклона ПСО  $m_{i_k}$ , из формулы (7) получим средний шаг продольного профиля в районе пункта  $K$ :

$$S_k^{cp} = \frac{m_h}{m_{i_k}} = \frac{m_{[h]}^{доп} s_k}{\sqrt{r^{пп} (i_k^2 m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta z}^2)}} \approx \frac{m_{[h]}^{доп} V_{cp} T \cos \nu_k}{\sqrt{0,1 L_{(м)} (\tan^2 \nu_k \cdot m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta z}^2)}}, \quad (10)$$

где  $m_{[h]}^{доп}$  – допустимая погрешностью определения высот ПСО;  $L_{(м)}$  – числовое значение длины оползня в метрах;  $T$  – продолжительность мониторинга;  $V_{cp}$  – ожидаемая скорость смещения оползня;  $r^{пп}$  – проектное число пунктов в профиле; остальные обозначения – см. формулы (6) и (7).

Из формулы (10) можно найти расчётную *продолжительность наблюдений*  $T$ :

$$T = \frac{S_{cp} \sqrt{r (\tan^2 \nu_{cp} \cdot m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta z}^2)}}{m_{[h]}^{доп} V_{cp} \cos \nu_{cp}}, \quad (11)$$

где  $S_{cp}$  – средний шаг профиля;  $\nu_{cp}$  – предварительная оценка среднего наклона ПСО;  $r$  – количество пунктов в профиле; остальные обозначения – см. формулу (10).

В заключение второй главы проведён анализ влияния различных источников случайных погрешностей на результат динамического нивелирования и выработаны методические рекомендации для организации мониторинга:

- координаты  $X, Y, Z$  деформационных пунктов следует определять с точностью:  $m_{X,Y} \leq 5$  мм,  $m_Z \leq 1$  мм;
- зарегистрированное смещение оползня должно превышать 0,1 м;
- для уменьшения влияния погрешности  $m_{\alpha^m}$  пункты оползневой сети следует закладывать вдоль линий, ориентированных по направлению предполагаемого смещения оползня, и на удалении более 20 метров от его бортов;
- для уменьшения случайных погрешностей метода следует создавать деформационные сети с расстоянием по направлению смещения: в головной и подошвенной частях оползня  $S_k^{cp} \approx 5$  м, в зоне выноса  $S_k^{cp} \leq 20$  м.

**В третьей главе «Методические погрешности динамического нивелирования» критически рассмотрены исходные постулаты метода.**

Главное внимание уделено изменению кривизны ПСО. При использовании кусочно-круговой и кусочно-параболической моделей ПСО кривизна модели изменяется скачкообразно. Из-за несоответствия формы реальной ПСО и её теоретической модели, посчитанные по формуле (1) или (2) превышения будут содержать систематическую погрешность  $\Theta_h$ .

Для расчёта  $\Theta_h$  предлагается использовать высотные невязки трёхсторонних полигонов  $f_h$  (на рисунке 3 – невязки  $f_1, f_2, f_3$ ):

$$|f_h| = |h_{1-2} + h_{2-3} + h_{3-1}| \leq f_h^{don}, \quad (12)$$

где  $h_{1-2}, h_{2-3}, h_{3-1}$  – превышения на ПСО между соответствующими точками хода;  
 $f_h$  – невязка трёхстороннего полигона;  $f_h^{don}$  – допустимая высотная невязка.

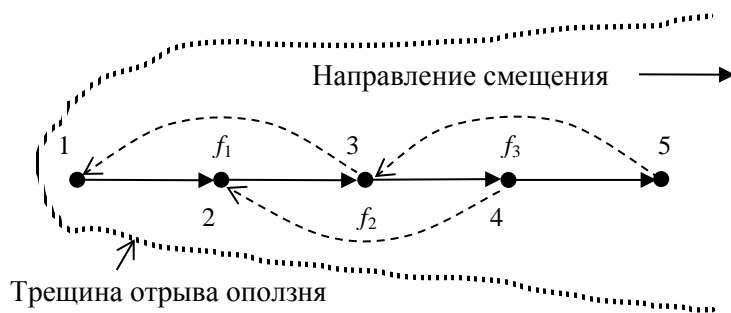


Рисунок 3 – Схема вытянутого хода из пяти пунктов, включающего три трёхсторонних полигона  
 Преобладание в ходе невязок одного знака указывает на *присутствие в сумме превышений монотонно изменяющейся систематической погрешности*  $\Theta_{[h]}^{мон}$ . Если исключены грубые погрешности измерений, что обеспечивается на этапе предварительной обработки векторов смещений (глава 4), то недопустимая невязка сигнализирует о наличие в сумме превышений *переменной систематической погрешности*  $\Theta_{[h]}^{неп}$  исходной теоретической модели ПСО.

Анализ данных мониторинга крупного оползня, расположенного в Коломенском музее-заповеднике г. Москвы, показывает, что размер систематической погрешности превышения существенно зависит от расположения пунктов на склоне и максимален в местах резких перегибов ПСО.

Ниже представлены формулы для расчёта монотонной  $\Theta_{[h]}^{мон}$  и переменной  $\Theta_{[h]}^{неп}$  составляющих систематической погрешности в ходе, выведенные для случая расположения пунктов на одном профиле (рисунок 3):

$$\Theta_{[h]}^{мон} \approx -\frac{1}{6} \cdot \sum_1^N f_h, \quad (13)$$

$$\Theta_{[h]}^{неп} \approx \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\sum_1^N \Delta f_h^2}, \quad (14)$$

где  $f_h$  – невязки перекрывающихся *трёхсторонних полигонов*, входящих в профиль (на рис. 3 полигоны: 1-2-3-1, 2-3-4-2, 3-4-5-3);  $\Delta f = (f_h | - f_h^{дон}) > 0$  – часть невязки  $f_h$ , превышающая в допуск  $f_h^{дон}$ ;  $N$  – общее количество невязок.

Сравнение количественных оценок монотонной и переменной составляющих систематической погрешности позволяет выбрать оптимальный способ обработки данных динамического нивелирования (глава 4).

Для уменьшения влияния систематической погрешности моделирования ПСО  $\Theta_{[h]}$  рекомендуется:

- создавать деформационные оползневые сети профильной структуры;
- ограничивать максимальные расстояния между смежными деформационными пунктами 20 метрами;
- сгущать профили в местах резких перегибов ПСО, где  $|f_h| > f_h^{don}$ ;
- оптимизировать теоретические модели ПСО (см. главу 4).

Приведём итоги анализа других факторов, приводящих к методическим погрешностям динамического нивелирования:

- Представление об оползневом теле, как о абсолютно твёрдом (не изменяющем размер и форму) является упрощением, справедливым только для медленных смещений и небольших интервалов времени. Лучше удовлетворяют этому требованию блоковые оползни, хуже – вязкопластические. Поэтому *метод динамического нивелирования рекомендуется для изучения ПСО типичных блоковых оползней (сдвига, выдавливания) при постановке регулярных наблюдений.*

- В теории метода предполагается, что движение оползневого тела происходит по одной поверхности скольжения. В реальности это условие может не выполняться (многоярусность). В работе даны методические рекомендации для динамического нивелирования в случае присутствия на оползневом теле вторичных оползней: способ обнаружения по результатам мониторинга вторичных оползней, геометрическая схема обхода видимых оплывин, дифференциация зарегистрированных смещений на смещения по ПСО первого и второго порядков, комплексирование динамического нивелирования с другими методами изучения ПСО.

- О форме ПСО мы судим по измеренным смещениям деформационных пунктов, отождествляемых с телом оползня. Однако в зарегистрированном смещении пункта присутствует составляющая, прямо не связанная с движением оползня.

На центр деформационного пункта оказывают влияние множество негативных периодических и разовых факторов, способствующих его *нестабильности* (неустойчивости относительно оползневого тела). В работе установлено, что сезонное смещение типичного деформационного пункта по высоте составляет первые миллиметры, превышая погрешности высокоточного нивелирования. Показано, что внезапное изменение координат и высот пунктов является достаточно распространённым явлением, требующим разработки алгоритмов фильтрации данных от *нестабильных* деформационных пунктов. Даны рекомендации по закладке деформационных оползневых пунктов, обеспечивающие их максимальную представительность, сохранность и удобство использования.

**В четвёртой главе «Приёмы обработки данных динамического нивелирования»** рассмотрены способы вычислительной обработки данных, уменьшающие влияние погрешностей на результаты динамического нивелирования.

Ранее установлено, что достоверность рассматриваемого метода во многом зависит от качества определения смещений. Грубая погрешность, допущенная на одном пункте, искажает все последующие по ходу высоты.

Чтобы при обработке не допустить грубую погрешность, необходимо иметь контроль превышений на ПСО по невязкам в ходах и контроль входных данных. Первое обеспечивается, как правило, комплексированием динамического нивелирования с другими методами исследований, дающими дополнительную информацию о ПСО. Второе подразумевает обязательную процедуру предварительной обработки данных геодезического мониторинга (*предобработки*).

*Предобработка* опирается на представление о *прямолинейном характере движения деформационных пунктов*. Используя это условие можно проверить пригодность каждого пункта для динамического нивелирования и уточнить полученные при мониторинге смещения. При этом число циклов наблюдений должно быть не менее трёх.

*Предобработка* измеренных смещений пункта включает следующие этапы:

1. Корреляционный анализ плановых смещений  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , а также полных плановых  $\Delta s$  и высотных смещений  $\Delta z$ .

Прямолинейный характер движения должен подтверждаться высокими линейными корреляциями  $r_{\Delta x/\Delta y}$  и (или)  $r_{\Delta z/\Delta s}$ . Низкий коэффициент корреляции (меньше 0,5) может объясняться недостаточной точностью определения одного из параметров корреляции или её отсутствием. Если обеих корреляций не установлено, то пункт исключается из дальнейшей обработки.

2. Определение вероятнейших значений дирекционного угла и угла наклона вектора смещения с помощью уравнения регрессии.

Рассчитываем коэффициенты при уравнениях линейной регрессии  $\varepsilon$ ,  $i$  и их погрешности  $m_\varepsilon$ ,  $m_i$ :

$$\varepsilon = \tan \alpha = r_{\Delta x/\Delta y} \frac{\sigma(\Delta x)}{\sigma(\Delta y)}; \quad i = \tan \nu = r_{\Delta z/\Delta s} \frac{\sigma(\Delta z)}{\sigma(\Delta s)}, \quad (15)$$

$$m_\varepsilon = \frac{\sigma(\Delta x)}{\sigma(\Delta y)} \sqrt{\frac{1 - r_{\Delta x/\Delta y}^2}{n - 2}}; \quad m_i = \frac{\sigma(\Delta z)}{\sigma(\Delta s)} \sqrt{\frac{1 - r_{\Delta z/\Delta s}^2}{n - 2}}, \quad (16)$$

где  $\alpha$ ,  $\nu$  – вероятнейшие значения дирекционного угла и угла наклона вектора смещения;  $r_{\Delta x/\Delta y}$ ,  $r_{\Delta z/\Delta s}$  – коэффициенты линейной корреляции между смещениями;  $\sigma(\Delta x)$ ,  $\sigma(\Delta y)$ ,  $\sigma(\Delta z)$ ,  $\sigma(\Delta s)$  – СКО ряда соответствующих смещений.

Найденные параметры используются для расчёта превышений и оценки точности динамического нивелирования.

3. Регрессионная оценка точности векторов смещений применяется при необходимости проведения независимой оценки точности геодезической информации, полученной из полевых измерений.

а) Регрессионная оценка плановых координат пункта проводится по отклонениям фактической траектории движения пункта от линейного тренда. Приняв  $m_x^{рег} \approx m_y^{рег} = m_{x,y}^{рег}$  (круговая область погрешностей – рисунок 4), получим:

$$m_{x,y}^{рег} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y \cos r)^2}{n - 2}}, \quad (17)$$

где  $m_{X,Y}^{рег}$  – СКП регрессии (оценка плановых координат);  $y$  – отклонения ординат от линии тренда;  $r$  – румб вектора смещения;  $n$  – число циклов наблюдений.

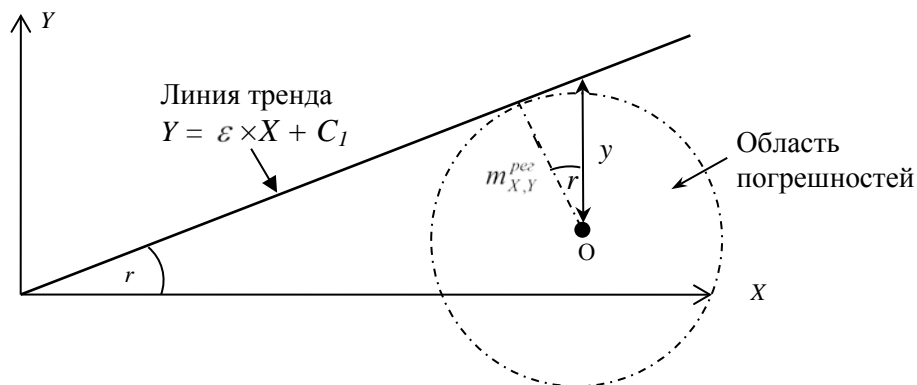


Рисунок 4 – К расчёту СКП плановых координат по отклонениям от линейной регрессии

Регрессионная погрешность координат  $m_{X,Y}^{рег}$  не идентична погрешности  $m_{X,Y}$ , полученной из уравнивания. Они соотносятся следующим образом:

$$m_{X,Y}^{рег} \approx \sqrt{m_{X,Y}^2 + \bar{m}_{X,Y}^2}, \quad (18)$$

где  $\bar{m}_{X,Y}$  – СКП определения положения оползня, вызванная нестабильностью направления смещения пункта в горизонтальной плоскости.

б) *Регрессионная оценка точности высотных измерений* для каждого пункта проводится по данным его плановых и высотных смещений. Так как точность определения смещения в плане и по высоте может существенно различаться, то область погрешностей ограничена эллипсом с полуосями:  $m_{\Delta s}^{рег}$  – СКП планового смещения, и  $m_Z^{рег}$  – СКП высоты (рисунок 5).

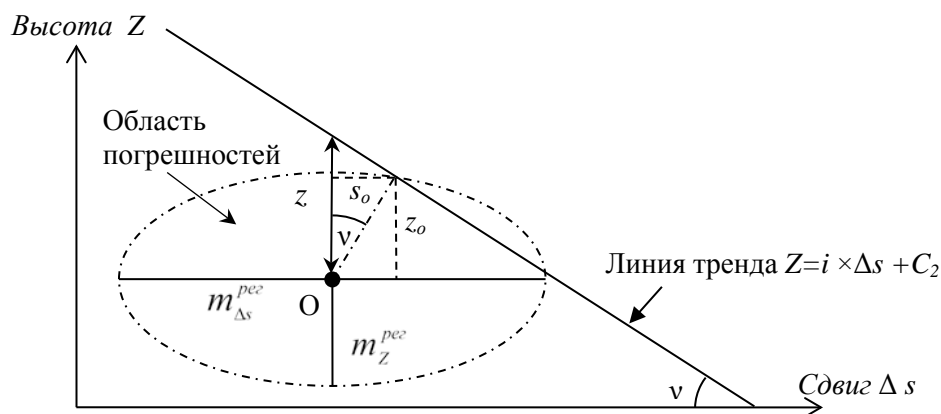


Рисунок 5 – К расчёту СКП высот по отклонениям от линейной регрессии



По аналогии с (17), рассчитаем характеристику разброса результатов относительно тренда, моделирующего траекторию движения пункта:

$$m_O^{pez} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z \cos \nu)^2}{n-2}}, \quad (19)$$

где  $m_O^{pez}$  – СКП регрессии;  $z$  – отклонения по высоте от линии тренда (рисунок 5);  $\nu$  – наклон вектора смещения;  $n$  – количество циклов наблюдений.

СКП высоты  $m_Z^{pez}$  получим из канонического уравнения эллипса:

$$m_Z^{pez} = \sqrt{\frac{m_{\Delta s}^2 z_o^2}{m_{\Delta s}^2 - s_o^2}} = \frac{m_{\Delta s} m_O^{pez} \cos \nu}{\sqrt{m_{\Delta s}^2 - (m_O^{pez} \sin \nu)^2}}. \quad (20)$$

Далее по формуле (18), заменив индексы  $X, Y$  на  $Z$ , можно найти *нестабильность* направления смещения пункта в вертикальной плоскости  $\bar{m}_Z$ .

Анализ экспериментальных данных, собранных автором в Коломенском музее-заповеднике, показывает, что «шумовая» компонента движения пункта в горизонтальной плоскости  $\bar{m}_{X,Y}$  в большинстве случаев пренебрежимо мала. В тоже время высотные статистические оценки  $m_Z^{pez}$  заметно отличались от точности нивелирования  $m_Z$ . Несмотря на качественную закладку, сезонная «шумовая» компонента движения пунктов по вертикали составила  $\bar{m}_Z \approx 1-2$  мм.

Таким образом, опытные данные показывают, что в расчётах по формулам (7), (10), (11) погрешности смещений  $m_{\Delta x}$  и, особенно,  $m_{\Delta z}$  следует выражать через регрессионные оценки координат пунктов  $m_{X,Y}^{pez}$  и  $m_Z^{pez}$ , полнее характеризующие точность определения смещений оползня.

Далее в работе излагаются два способа обработки профильных сетей, позволяющие уменьшить систематическую погрешность динамического нивелирования  $\Theta_{[h]}$ , вызванную несовершенством кусочно-круговой и кусочно-параболической моделей ПСО.

Первый *регрессионный способ* предполагает выбор математической модели линии скольжения в процессе статистической обработки всего ряда данных. Общий вид модели находится при условии максимального приближения её к обрабатываемому ряду данных и соответствия модели типу оползня.

Задача решается в два этапа. Сначала находится статистическая зависимость уклона линии скольжения в точке от её местоположения на профиле  $i_{рег} = f(S)$ . Потом уравнение регрессии интегрируется по аргументу  $S$  для расчёта высот отдельных точек. В итоге получаем массив высот  $H_k$  вспомогательных точек профиля, который можно представить в виде таблицы или графика.

*Регрессионный способ* можно рекомендовать для моделирования линий скольжения типичных оползней выдавливания, имеющих правильную форму (парабола, клотоида и т.п.) при большой плотности оползневой сети. У таких оползней преобладают монотонные погрешности:  $\Theta_{[h]}^{мон} > \Theta_{[h]}^{неп}$ .

Второй *сплайн-способ* вычисления высот следует применять в том случае, если в невязках преобладают переменные систематические погрешности  $\Theta_{[h]}^{неп} \geq \Theta_{[h]}^{мон}$  (сложная ПСО с резкими перегибами). Тогда для интерполяции уклонов целесообразно применение *кубических сплайнов*  $i_{сплайн} = f(S)$ , заданных на каждом интервале области определения отдельной формулой. Графически такой сплайн представляет собой кривую с плавно изменяющейся кривизной. Для вычисления высот вспомогательных точек профиля полученный сплайн интегрируют по аргументу  $S$ .

Моделирование ПСО с помощью сплайнов является наиболее универсальным способом обработки данных динамического нивелирования.

**В пятой главе «Разработка методики динамического нивелирования»** создаётся алгоритм динамического нивелирования с достаточной для практики точностью определения высот ПСО и проводится апробация методики.

Структурная схема методики представлена в таблице 1.

Приведём **основные положения методики динамического нивелирования**, согласованные с ГОСТ Р 8.563-2009 ГСИ. Методики (методы) измерений.

- **Область применения** – изучение высот ПСО глубоких (до 50 метров) одноярусных оползней сдвига и выдавливания, находящихся в стадии подготовки основных смещений или повторных смещений (скорость 0,1–1 метр в год), путём продолжительного (1 год и более) геодезического мониторинга.

- **СКП определения высот ПСО:**

- до 1 метра (при пересечении профилями только верхних границ оползня);

- до 0,5 метра (профили пересекают нижние и верхние границы оползня).

- **Геодезическая сеть** – в процессе проектирования предпочтение следует отдавать профильной структуре сети с преобладанием продольных створов.

Таблица 1 – Структурная схема методики динамического нивелирования

<b>1. Подготовка измерений:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- сбор информации об объекте;</li> <li>- проектирование сети и разработка программы измерений (8-11);</li> <li>- закладка геодезической сети.</li> </ul>	
<b>2. Выполнение измерений:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- выполнение ряда циклов полевых измерений с соблюдением допусков;</li> <li>- определение координат и высот пунктов деформационной сети, расчёт смещений;</li> <li>- оценка точности координат и высот; оценка точности смещений (если цикла два);</li> <li>- измерение по плану направлений максимального наклона ПСО.</li> </ul>	
<b>3. Предварительная статистическая обработка (только для рядов смещений):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- контроль векторов смещений на основе корреляционного анализа;</li> <li>- определение усреднённых угловых характеристик векторов смещений и их погрешностей по формулам (15, 16);</li> <li>- регрессионная оценка точности положения пунктов (17-20) (при необходимости).</li> </ul>	
<b>4. Оценка точности динамического нивелирования (внутренняя):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- расчёт случайной погрешности определения высот ПСО (5-7);</li> <li>- расчёт монотонной и переменной составляющих систематической погрешности определения высот ПСО (13-14);</li> </ul>	
<b>5. Определение высот ПСО:</b>	
<b>Профильная сеть</b>	<b>Площадная сеть</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- расчёт превышений:                             <ul style="list-style-type: none"> <li><i>а) кусочно-круговой или кусочно-параболический способ:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- расчёт превышений через наклоны или уклоны векторов смещений смежных пунктов (1, 2);</li> <li>- последовательное суммирование превышений (4);</li> </ul> </li> <li><i>б) сплайн- способ:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- интерполяция уклонов в профиле кубическими сплайнами <math>i_{\text{сплайн}} = f(S)</math>;</li> <li>- интегрирование функции по аргументу <math>S</math>;</li> </ul> </li> <li><i>в) регрессионный способ:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- аппроксимация уклонов в профиле уравнением регрессии <math>i_{\text{рег}} = f(S)</math>;</li> <li>- интегрирование функции по аргументу <math>S</math>;</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- высотная привязка (3);</li> <li>- переход к ПСО интерполированием высот между профилями.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- расчёт превышений:                             <ul style="list-style-type: none"> <li><i>а) триангуляционный способ:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- разбиение сети на треугольники;</li> <li>- расчёт превышений по сторонам треугольников через уклоны векторов смещений смежных пунктов (2);</li> <li>- расчёт весов превышений: <math>P \approx 1/m_i^2</math>;</li> <li>- уравнивание превышений;</li> </ul> </li> <li><i>б) способ квадратов:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- построение планов продольного и поперечного уклонов ПСО;</li> <li>- построение на планах сетки квадратов с шагом, соответствующим расстояниям между пунктами;</li> <li>- расчёт превышений между узлами сетки квадратов (2);</li> <li>- расчёт весов превышений: <math>P \approx 1/m_i^2</math>;</li> <li>- уравнивание превышений;</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- высотная привязка сети;</li> <li>- построение ПСО</li> </ul>
<b>6. Уравнивание высот ПСО</b> (при наличии избыточных данных: инклинометрии, тензометрии и т.п.)	
<b>7. Окончательная оценка точности (внешняя) модели ПСО:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- количественная (по результатам сравнения с данными прямых измерений высот ПСО);</li> <li>- качественная (по результатам экспертной оценки).</li> </ul>	

Количество продольных профилей определяется из расчёта один профиль на 100–150 м ширины оползня. Продольные профили не рекомендуется размещать ближе 20 м к бортам оползня. Расстояния между пунктами продольных профилей: в головной части оползня и зоне выдавливания – 5-10 м, в зоне выноса – до 20 м. В продольные профили желательно включать инклинометрические скважины.

Опорные пункты располагаются по периметру оползневого массива. Требования к закладке опорных и деформационных пунктов определены в Своде правил по инженерно-геодезическим изысканиям для строительства.

- **Периодичность и продолжительность мониторинга** – зависит от скорости движения оползня. Рекомендуемая продолжительность не меньше 1 года, при этом за время мониторинга зарегистрированное смещение должно превысить 0,1 м. Общее количество циклов должно быть не меньше четырёх.

- **Точность измерений** – при медленных смещениях (около 0,1 м в год) должна обеспечивать определение плановых координат с погрешностью до 5 мм, высот – до 1 мм.

Направление максимального наклона ПСО, соответствующее направлению падению мезорельефа оползня, определяется по топографическому плану с максимально возможной точностью.

- **Алгоритм обработки данных** – зависит от плотности пунктов и конфигурации деформационной сети. В основных этапах он представлен в таблице 1 (графы 3–7). Процедура включает априорную оценку точности динамического нивелирования (при необходимости), контроль измеренных смещений, расчёт высот ПСО, уравнивание высот (при наличии избыточных данных), контроль и апостериорную оценку точности результатов.

В конце главы проводится апробация методики динамического нивелирования в части обработки результатов мониторинга. Объектом исследования послужил оползень выдавливания, расположенный в районе Хорошёвского спрямления реки Москвы. Деформационная сеть на объекте включает 6 продольных профилей, из которых 4 пересекают тело активного оползня.

Средний шаг профиля 13 м, полное смещение оползня за время наблюдений 0,1 м, число контрольных инклинометрических скважин – 5 шт.

На рисунке 6 представлен графический результат динамического нивелирования – план ПСО с горизонталями. СКП определения высот ПСО, рассчитанная по формуле (7), составила 1,6 м.

Контроль динамического нивелирования проводился по отклонениям найденных высот от данных скважинной инклинометрии. Расхождения в высотах точек, полученных двумя методами, не превысили 2 метров, что лежит в пределах допустимого расхождения, рассчитанного с использованием формулы (7).

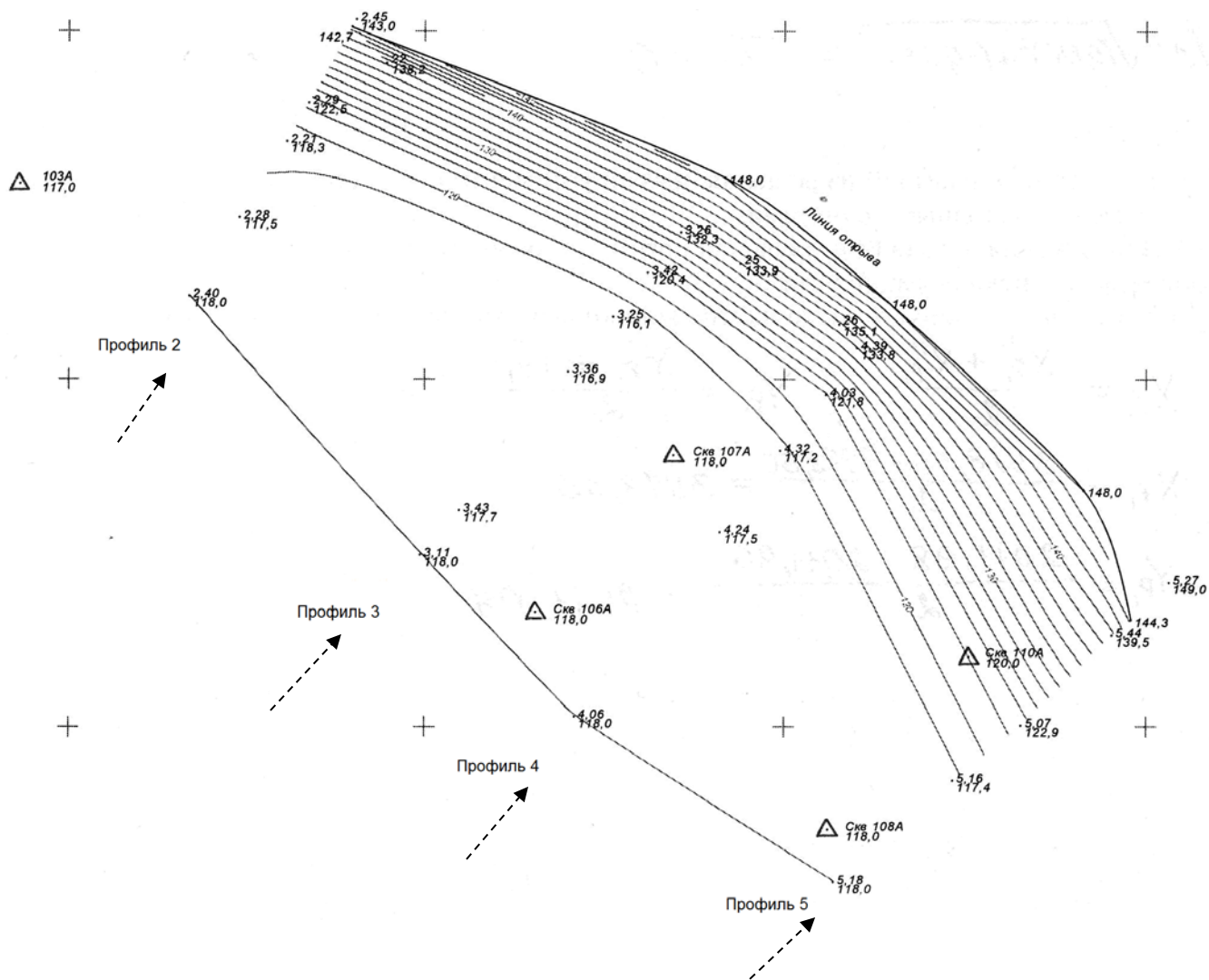


Рисунок 6 – План ПСО с горизонталями

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже приведены **основные итоги** диссертационного исследования.

1. Проведённый анализ состояния дел при инженерных изысканиях опасных склоновых процессов выявил **актуальность разработки метода исследования геометрии ПСО на основе геодезического мониторинга.**
2. Показано, что главным препятствием на пути изучения ПСО по векторам смещений деформационных пунктов является **недостаточная теоретическая проработка метода** и, как следствие, **отсутствие аттестованных методик выполнения измерений.**
3. В целях теоретического обоснования нового геодезического метода определения высот ПСО по результатам наземных геодезических измерений был проведён **анализ влияющих на результат измерения факторов.** Выведены формулы для **случайных и систематических погрешностей метода**, позволяющие проводить априорную и апостериорную оценки точности результатов.
4. Даны **методические рекомендации для уменьшения отдельных погрешностей метода:** СКП определения направления максимального наклона, погрешности теоретической модели ПСО, погрешности за счёт неустойчивости деформационных пунктов относительно оползневого тела и других погрешностей. Предложена **оптимальная структура оползневой сети** – профильная с преобладанием линий, вытянутых по направлению смещения.
5. Разработана методика расчёта **предельных расстояний между смежными пунктами** в разных частях оползня и установлен **критерий для дополнительного сгущения сети.** Выведена формула для определения **продолжительности мониторинга.**
6. Предложен алгоритм **предварительной статистической обработки векторов смещений**, позволяющий проводить контроль и оценку точности полученных при деформационном мониторинге смещений.
7. Разработаны **способы моделирования ПСО** (регрессионный, сплайн-способ), позволяющие уменьшить влияние непостоянства кривизны ПСО на результат динамического нивелирования. Даны рекомендации по их применению.
8. Разработана методика, позволяющая определять поверхность скольжения глубоких блоковых оползней, находящихся в фазе глубинной ползучести, с достаточной для решения инженерных задач точностью.
9. Методика **успешно апробирована** на оползнях выдавливания в г. Москве (Коломенское, Хорошёво).
10. Результаты проведённых исследований позволяют **рекомендовать предлагаемый геодезический метод изучения геометрии ПСО для широкого применения при стационарном изучении блоковых оползней.**

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Применение ГНСС при геодезических наблюдениях оползневого склона реки Москвы в районе Чертановского коллектора: монография «Информационное обеспечение кадастров пространственными данными» / А.И. Кузнецов. – М.: ГУЗ, 2006 – с. 169-176.
2. Деформационные пункты: альтернатива традициям / А.И. Кузнецов, С.А. Моисеенко // Журнал «Инженерные изыскания» 2/2009 – с. 38-43.
3. Моделирование оползневых процессов по данным геодезических наблюдений на территории Коломенского парка г. Москвы / А.И. Кузнецов // Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 230-летию со дня основания ГУЗ.- М.: ГУЗ, 2009 – с. 160-167.
4. Изучение поверхности скольжения оползня традиционными геодезическими методами / А.И. Кузнецов, С.А. Моисеенко, В.А. Волков // Материалы шестой общероссийской конференции изыскательских организаций – 2010.- М.: ПНИИИС, 2011 – с. 238-240.
5. Определение поверхности скольжения оползня по результатам геодезического мониторинга / А.И. Кузнецов // Материалы шестой международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов – 2010, -М.: ГУЗ, 2011 – с. 156-161.
6. Опыт использования данных геодезического мониторинга для построения поверхности скольжения оползня. / А.И. Кузнецов, С.А. Моисеенко, В.А. Волков // Журнал «Инженерные изыскания» 2/2011-с. 56-59.
7. К вопросу организации геодезического мониторинга оползневых процессов / А.И. Кузнецов // Журнал «Инженерные изыскания» 10/2011 – с. 30-33.
8. Оценка точности результатов геодезического мониторинга оползневых процессов с использованием регрессионного анализа / А.И. Кузнецов // Журнал «Геодезия и картография» 10/2011-с. 8-13.
9. К вопросу о структуре оползня на Карамышевской набережной р. Москвы. / В.А. Волков, А.В. Тихонов, А.В. Калинина, С.М. Аммосов, А.И. Кузнецов // Материалы седьмой общероссийской конференции изыскательских организаций. – М.: ПНИИИС, 2011.- с. 21-24.



*Редакционно-издательский отдел ГУЗ*  
Сдано в производство 15.02.2013. Подписано в печать 13.02.2013.  
Формат 60x 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 1,0 п.л. Бумага офсетная.  
Тираж 130 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

---

Отдел оперативной полиграфии ГУЗ  
105064, г. Москва, ул. Казакова, 15