

## Диагностирование и определение аномальных зон магистральных трубопроводов на подводных переходах с использованием цифровой модели рельефа

М. Г. Мустафин<sup>1</sup>, Н. С. Павлов<sup>1</sup>, В. А. Вальков<sup>1</sup>, Б. Ю. Васильев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* e-mail: Vasilev\_BYu2@pers.spmi.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы геодезического обеспечения мониторинга технического состояния подводных переходов магистральных газопроводов (ППМГ). Целью исследования является увеличение точности определения глубины залегания газопровода на участках подводных переходов магистральных газопроводов путем учета зон ошибочного определения положения трубопровода (аномальных зон) и поверхности дна над ППМГ. Главной проблемой в определении технического состояния участка газопровода на подводном переходе магистрального газопровода является сложность определения глубины залегания газопровода из-за влияния на измерительные приборы (подводные трассоискатели) внешних факторов (слагающий дно грунт, сторонние конструкции и коммуникации). В исследовании указаны точность построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) дна, от которых проводится вычисление защитного валика над газопроводом, что влияет на определение технического состояния, и причины возникновения аномальных зон, а также способы их определения. Изучены варианты увеличения точности вычисления глубин залегания газопровода с учетом данных ЦМР. Предлагается подход к определению метода пространственной интерполяции для построения ЦМР дна по данным эхолокации в зависимости от изменения кривизны поверхности. Авторами отмечена взаимосвязь определения критерия технического состояния подводного перехода с точностью построения ЦМР и определением пространственного положения трубопровода. Предлагаемые подходы направлены на уменьшение влияния систематической части погрешности и повышение точности глубин залегания, что является актуальной задачей.

**Ключевые слова:** ЦМР, облако точек, методы пространственной интерполяции, средняя квадратическая погрешность, кригинг, радиальная базисная функция, естественный сосед, ближайший сосед, триангуляция, минимальная кривизна, подводные переходы магистральных газопроводов, гидрографическая съемка

### Введение

Целостность подводных переходов трубопроводов является важным компонентом управления и обслуживания нефтегазовой инфраструктуры во всем мире. Нарушения водного баланса на указанных объектах приводят к крупным сбоям или авариям, имеющим разрушительные последствия как для окружающей среды, так и для экономики [1].

Главной задачей мониторинга технического состояния ППМГ является определение пространственных координат трубопровода и глубины залегания на предмет соответствия проектной документации [2]. Основным методом получения данных считается гидрографическая съемка [3].

Для определения глубины залегания газопровода вычисляют разность отметок поверхности дна и верхней образующей трубы. Построение ЦМР может быть выпол-

нено различными методами пространственной интерполяции [4]. Поскольку каждый ППМГ является уникальным объектом, то универсальные решения к построению ЦМР отсутствуют. Выбор метода влияет на точность построения поверхности [5–7] и дальнейшего определения глубины залегания. Специфика моделирования рельефа дна во многом схожа с созданием топографических поверхностей по данным сканирующих систем [8–11]. Распространены следующие методы [6, 12–15]:

- 1) триангуляция;
- 2) кригинг;
- 3) обратные взвешенные расстояния;
- 4) минимальная кривизна;
- 5) естественный сосед;
- 6) ближайший сосед;
- 7) радиальная базисная функция.

Вторым источником ошибок в определении глубины залегания трубопровода явля-

ется точность получения пространственных координат уложенной трубы, вычисляемых по данным судового трассопоискового приемника в рамках работ по мониторингу технического состояния ППМГ [16, 17]. Генератор создает вдоль оси трубопровода электромагнитное поле. Антенна трассоискателя, установленная на судне, производит измерения сквозь толщу воды и грунта, слагающего дно. Из-за неоднородности слоев измерения подвергаются искажениям. В инструкции к приборам указываются наиболее благоприятные условия производства работ, как правило, отсутствующие на практике.

В качестве основных критериев, влияющих на показания электромагнитного трассоискателя, можно выделить следующие:

- 1) слагающий дно грунт;
- 2) наличие металлических и бетонных конструкций вблизи области измерений;

3) близость других ниток газопровода на подводном переходе;

4) прочие коммуникации, прокладываемые вдоль газопровода;

5) защитные и укрепительные части подводного перехода.

Отметим, что если глубина залегания газопровода меньше нормативно допустимого значения в 1 м [18, 19], то выполняются ручные водолазные промеры для уточнения и подтверждения результатов измерений [20].

Рассмотрим поэтапно вопросы создания ЦМР дна и определение пространственных координат верхней образующей трубопровода.

### Исходные данные

При построении цифровых моделей использовались данные батиметрической съемки восьми участков ППМГ (рис. 1).

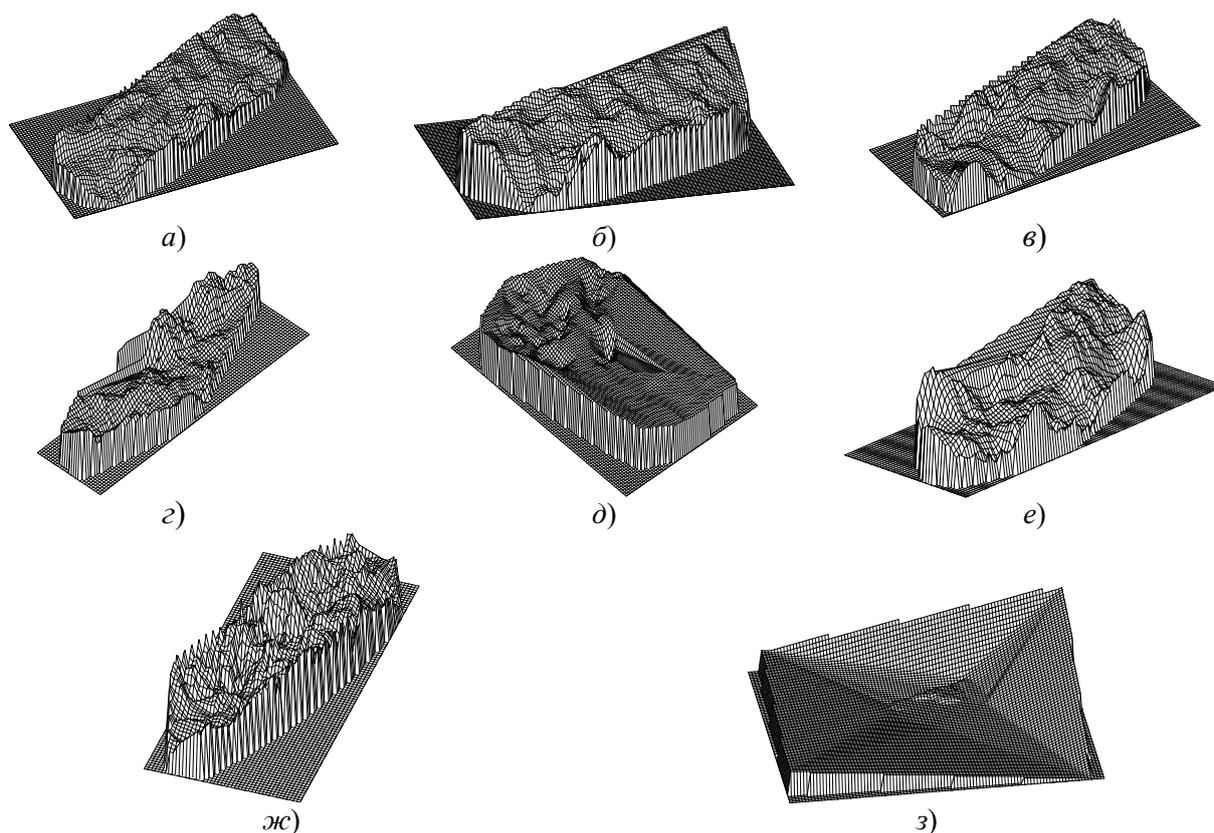


Рис. 1. Цифровые модели подводного рельефа:

a), б), в), г) подводные переходы магистральных газопроводов линейной конфигурации через реки без значительных изменений кривизны поверхности; д) ППМГ площадной конфигурации через реку с большим изменением кривизны поверхности; е) подводный переход магистральных газопроводов линейной конфигурации через реку с незначительным изменением кривизны поверхности; ж) ППМГ линейной конфигурации через реку со значительным изменением кривизны поверхности; з) ППМГ площадной конфигурации через реку со значительным изменением кривизны поверхности

Перепады высот на участках *a, б, в, г* не превышают 2 м, на участках *д, е, ж* – 3 м, а на участке *з* – 20 м.

### Методы построения цифровых моделей рельефа дна

**Триангуляция.** Использует оптимальную триангуляцию Делоне [21], которая является по своей сути планарным графом без пересечений.

Если новая точка попала в треугольник, образованный тремя точками с известными координатами (*X, Y, Z*), то строится плоскость, проходящая через эти три точки. При этом уравнение плоскости при этом имеет вид

$$a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z + d = 0,$$

где коэффициенты:

$$a = Y_1(Z_2 - Z_3) + Y_2(Z_3 - Z_1) + Y_3(Z_1 - Z_2);$$

$$b = Z_1(X_2 - X_3) + Z_2(X_3 - X_1) + Z_3(X_1 - X_2);$$

$$c = X_1(Y_2 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_2);$$

$$d = X_1(Y_2Z_3 - Y_3Z_2) + X_2(Y_3Z_1 - Y_1Z_3) + X_3(Y_1Z_2 - Y_2Z_1).$$

Оценка переменной *Z* в новой точке (*X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>*) осуществляется по формуле

$$\hat{Z}_0 = \frac{-a \cdot X - b \cdot Y - d}{c}.$$

**Кригинг.** В основу метода кригинга заложены статистические модели с анализом автокорреляции [22].

Чтобы оценить значения неизвестной *Z*, применяют следующую формулу:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i,$$

где *n* весов  $\lambda_i$  являются решением системы кригинга:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i C_{ij} = C_{0j}; j = 1, \dots, n.$$

**Обратные взвешенные расстояния.** Чтобы оценить неизвестную *Z*, используется среднее взвешенное значение [22] переменной *Z*

$$\hat{Z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^n w_{i0}}.$$

При этом веса вычисляются по следующей формуле:

$$w_{i0} = \frac{1}{(\sqrt{d_{i0} + \delta^2})^\beta},$$

где *d<sub>i0</sub>* – расстояние между точкой, где вычисляется оценка, и *i*-й точкой измерения;  $\delta$  – параметр сглаживания;  $\beta$  – степенной параметр.

**Минимальная кривизна.** Построенная поверхность может быть представлена как тонкая упругая пленка, необязательно проходящая через все исходные точки [23].

На первом этапе построения по методу наименьших квадратов (МНК) по всем исходным данным строится интерполяционная поверхность *Z(X, Y)*:

$$Z(X, Y) = a + b \cdot X + c \cdot Y.$$

Далее выполняется интерполяция разностей в узлах сетки путем решения модифицированного дифференциального уравнения:

$$(1 - T_i) \nabla^2 (\nabla^2 e) - (T_i) \nabla^2 e = 0,$$

где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа; *T<sub>i</sub>* – параметр, влияющий на внутреннюю кривизну построения.

Чтобы оценить точность неизвестной *Z*, используют следующую формулу:

$$\hat{Z}(X, Y) = a + b \cdot X + c \cdot Y + \hat{e}(X, Y).$$

**Естественный сосед.** Для интерполяции значений используются взвешенные значения

соседних точек [24], вычисляемые с помощью пропорциональных площадей:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^N w_{i0} Z_i,$$

где  $w_{i0}$  – вес  $i$ -й точки.

Высоты новых точек обязательно находятся в пределах исходных значений [25].

*Ближайший сосед.* При интерполяции значения неизвестной точки получаются через ближайшие к искомой точке данные [26].

Для того чтобы оценить неизвестную внутри интерполяционной области, используется ближайшее известное [27] значение

$$\hat{Z}_0 = Z_i,$$

где  $Z_i$  – значение в известной точке.

*Радиальная базисная функция (РБФ).* Получаемая данным методом поверхность гарантированно проходит через входные данные.

Чтобы оценить неизвестную  $Z$  в определяемой области, используют следующую формулу:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i B(d_{i0}),$$

где  $d_{i0}$  – расстояние между точкой, где вычисляется оценка, и  $i$ -й точкой измерения;  $\lambda_i$  – коэффициент  $i$ -й выборочной точки;  $B(\ )$  – радиальная базисная функция.

Функция  $B(\ )$  определяет веса для интерполируемых точек [28]. В исследовании используются пять видов базисных функций [29]:

1) мультикватричная функция

$$B(d) = \sqrt{d^2 + R^2};$$

2) мультилогарифмическая функция

$$B(d) = \log(d^2 + R^2);$$

3) обратная мультикватричная функция

$$B(d) = \frac{1}{\sqrt{d^2 + R^2}};$$

4) кубический сплайн

$$B(d) = (d^2 + R^2)^{3/2};$$

5) плоский сплайн

$$B(d) = (d^2 + R^2) \log(d^2 + R^2),$$

где  $d$  – расстояние от точки интерполяции до исходной точки;  $R^2$  – параметр сглаживания.

Применение технологии сплайнов для создания топографических поверхностей, во многом схожих с поверхностями дна, рассмотрено в работе [30].

### Оценка точности построенных цифровых моделей подводного рельефа

Оценка точности методов пространственной интерполяции, используемых при построении ЦМР на участке подводных переходов магистральных газопроводов, выполнялась путем анализа средней квадратической погрешности (СКП) построения модели.

Информация об оценке точности построенных ЦМР для тестовых участков приведена в табл. 1.

Исходя из результатов, наименьшие значения СКП на участке А были получены при помощи методов триангуляции (2,2 см), кригинга (2,2 см) и естественного соседа (2,2 см); на участке Б можно выделить кригинг (0,9 см), триангуляцию (1 см) и метод естественного соседа (1,1 см). Наименьшее значение СКП построенных цифровых моделей подводного рельефа на участке В получено с помощью метода триангуляции (1,2 см), естественного соседа (1,3 см) и кригинга (1,5 см); на участке Г отмечены методы естественного соседа (1,1 см), триангуляции (1,2 см) и кригинга (1,5 см). Для участка Д выделен метод радиальной базисной функции в следующих вариантах: мультилогарифмическая функция (23,6 см), мультикватричная функция (23,7 см) и плоский сплайн (24,8 см). На участке Е отмечены методы триангуляции (0,6 см), кригинга (0,8 см) и ближайшего соседа (1,2 см.); на участке Ж метод кригинга (1,2 см). Для участка З авторы отметили метод естественного соседа (24,8 см).

Оценка точности построенных ЦМР

| Название метода                |                           | Значение СКП на тестовых участках, м |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                |                           | А                                    | Б     | В     | Г     | Д     | Е     | Ж     | З     |
| Триангуляция                   |                           | 0,022                                | 0,010 | 0,012 | 0,012 | 0,298 | 0,006 | 0,095 | 0,254 |
| Кригинг                        |                           | 0,022                                | 0,009 | 0,015 | 0,015 | 0,256 | 0,008 | 0,012 | 0,532 |
| Обратные взвешенные расстояния |                           | 0,033                                | 0,019 | 0,024 | 0,016 | 0,342 | 0,014 | 0,016 | 0,589 |
| Минимальная кривизна           |                           | 0,054                                | 0,041 | 0,044 | 0,020 | 0,306 | 0,038 | 0,038 | 0,590 |
| Естественный сосед             |                           | 0,022                                | 0,011 | 0,013 | 0,011 | 0,257 | 0,029 | 0,014 | 0,248 |
| Ближайший сосед                |                           | 0,035                                | 0,018 | 0,031 | 0,017 | 0,415 | 0,012 | 0,020 | 0,702 |
| РБФ                            | Мультикватричная          | 0,054                                | 0,064 | 0,047 | 0,088 | 0,237 | 0,046 | 0,042 | 0,517 |
|                                | Мультилогарифмическая     | 0,052                                | 0,049 | 0,045 | 0,510 | 0,236 | 0,049 | 0,042 | 0,536 |
|                                | Обратная мультикватричная | 0,051                                | 0,033 | 0,040 | 0,398 | 0,272 | 0,044 | 0,037 | 0,536 |
|                                | Кубический сплайн         | 0,048                                | 0,041 | 0,060 | 0,029 | 0,261 | 0,039 | 0,036 | 3,425 |
|                                | Плоский сплайн            | 0,057                                | 0,029 | 0,056 | 0,059 | 0,248 | 0,041 | 0,044 | 0,805 |

Полученные результаты свидетельствуют, что для построения цифровой модели рельефа дна на участках, не имеющих множественных или значительных изменений в кривизне поверхности (А–Г, Е), рекомендуется использовать линейный метод пространственной интерполяции, основанный на построении триангуляционных поверхностей.

В обратном случае следует применять методы с нелинейной составляющей. Так, для участка Д наилучшим образом подходит радиальная базисная функция (23,6 см при использовании мультилогарифмической функции), для участка Ж – кригинг (1,2 см), для участка З – естественный сосед (24,8 см).

Важно отметить, что чем больше площадь участка ППМГ, тем выше зависимость значения СКП построения ЦМР от пространственного разрешения.

### Определение аномальных зон

На практике часто встречаются локальные участки ошибочного определения положения трубопровода (как в плане, так и по высоте) из-за влияния внешних условий, которые

предлагается называть аномальными зонами. Для их выделения предлагается критерий среднеквадратической ошибки измерений, превышающей паспортные значения в три раза и более. В качестве контрольных измерений предлагается использовать непосредственное измерение глубины залегания трубопровода водолазным щупом.

На практике неоднократно отмечалось увеличение абсолютной ошибки определения глубины залегания в переходных местах изменения типа грунта, что свидетельствует о влиянии дисперсности на измерения и появлении аномальной зоны.

Наличие в грунте бетонных и металлических конструкций также приводит к помехам, что подтверждается натурными наблюдениями.

Аномальные зоны, связанные с естественным изменением дисперсности грунта, предлагается называть переходными аномальными зонами. Они показаны вертикальными прерывистыми линиями на рис. 2. Границы изменения дисперсности могут быть определены по проектной документации, а также получены в ходе геологических изысканий.

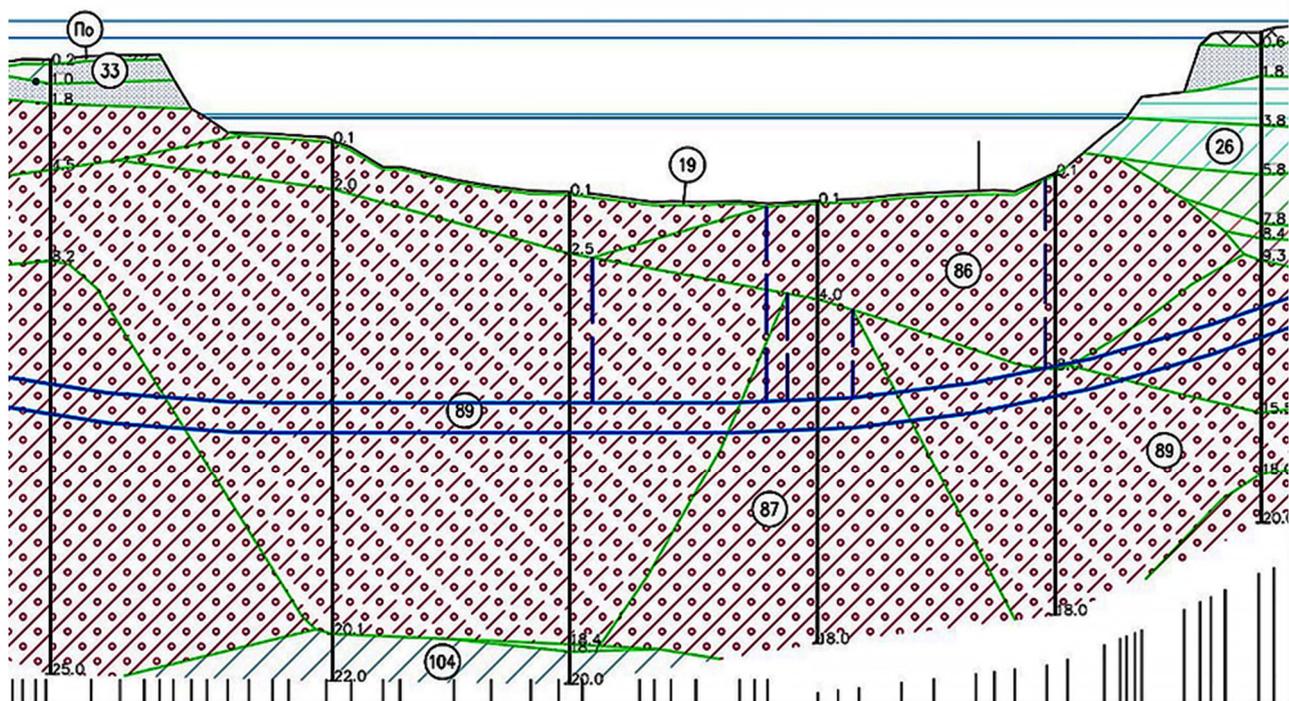


Рис. 2. Фрагмент профиля с аномальными зонами на подводном переходе:

86 – суглинок легкий пылеватый тугопластичный, с гравием и галькой до 25 %, с единичными валунами ( $R_0 = 320$  кПа); 87 – суглинок серо-коричневый легкий пылеватый твердый, с гравием и галькой от 20 до 35 %, с единичными валунами, с прослоями суглинка полутвердого, с линзами песка мелкого ( $R_0 = 350$  кПа); 89 – супесь серого цвета, твердая, пылеватая, с гравием и галькой от 20 до 35 %, с единичными валунами, с резкими прослоями песка пылеватого ( $R_0 = 300$  кПа); 104 – суглинок серого цвета тяжелый пылеватый полутвердый, с прослоями и линзами до 0,4 м песков мелких и пылеватых ( $R_0 = 260$  кПа); фиолетовая пунктирная линия – аномальные зоны; сплошная синяя линия – газопровод

Влияние аномальных зон на результаты полевых измерений хорошо прослеживается на примере ППМГ после капитального ремонта (рис. 3).



Рис. 3. Защитный банкет ППМГ

На участке был выполнен капитальный ремонт по средствам обваловки мешками с цементно-песчаной смесью (ЦПС) и обустройству водопропуска из гибких бетонных матов. Для усиления прочности мешки с ЦПС прошивались стальными анкерами, являющимися дополнительными металлическими элементами вблизи трубы газопровода.

Указанные технические решения влияют на состав грунта в непосредственной близости с газопроводом. Измененная дисперсность и наличие металлических элементов приводят к появлению аномалий, которые находят отражения в виде оголений трубопровода по результатам приборного обследования.

При этом по данным ручных промеров и произведенному капитальному ремонту на ППМГ отсутствуют участки с оголением или недозалеганием в русловой части, что противоречит данным приборного мониторинга.

Выявленные в ходе анализа участков с аномальным отличием от истинного положения газопровода закономерности позволили разработать способы борьбы с подобными ошибками.

### **Способы обработки измерений в аномальных зонах**

Определение или распознавание измерений, попавших в аномальные зоны, является важной и актуальной задачей.

В качестве технического сопровождения использованы автоматизированный комплекс «СКАТ-ТИЭМ2/2А» и сопутствующее программное обеспечение (ПО) PipeTracer – отечественные разработки научно-производственного предприятия «Форт XXI».

Для повышения точности результатов измерений, попавших в аномальные зоны, следует: 1) исключить измерение из процесса обработки; 2) скорректировать с помощью аппроксимации; 3) ввести поправки с учетом контрольных измерений, уменьшив величину абсолютной ошибки путем изменения ее систематической части.

В первом случае после исключения измерения из обработки увеличивается общая точность получаемых данных. Но при значительной протяженности аномальных зон или их

высокой частоте будут возникать продолжительные участки с пропущенными значениями.

Второй способ позволяет снизить величины абсолютной ошибки измерения, попавшего в границы зоны аномалии, путем усреднения от двух соседних (достоверных) точек. Рекомендуется применять комбинацию обоих способов, применяя второй для мест с высокой частотой аномальных зон.

Третий способ подразумевает выделение систематической части общей погрешности по контрольным измерениям. Для реализации предлагается применять критерий трех сигм. По анализу полевых данных установлено, что влияние дисперсности грунта на измерения меньше, чем влияние металлических элементов и железобетонных конструкций.

В таком случае с помощью увеличения поправки, полученной по контрольным измерениям, будет уменьшено влияние систематической погрешности

$$H_{it} = H \pm V \pm V \cdot K,$$

где  $H_{it}$  – итоговое значение глубины залегания газопровода;  $H$  – глубина залегания газопровода, полученная в ходе обработки исходных данных в ПО;  $V$  – поправка, полученная по контрольным измерениям;  $K$  – коэффициент влияния аномальной зоны в месте изменения дисперсности грунта.

Для вычисления коэффициента, применяемого для коррекции поправки, предлагается использовать следующую формулу:

$$K = \frac{R_{\max}}{(R_{\min} + R_{\max}) \cdot Q \cdot T},$$

где  $R_{\max}$  – максимальное значение дисперсности грунта в месте переходной аномальной зоны;  $R_{\min}$  – минимальное значение дисперсности в месте переходной аномальной зоны;  $Q$  – добавочный коэффициент;  $T$  – коэффициент, зависящий от количества изменений грунта в месте переходной аномальной зоны.

Предлагаемые значения добавочного коэффициента приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Значения добавочного коэффициента

| Тип перехода      | $R_{\max}$ | $R_{\min}$ | $Q$  |
|-------------------|------------|------------|------|
| Гравий – песок    | 3          | 1          | 1,67 |
| Гравий – глина    |            | 0,100      | 1,94 |
| Гравий – суглинок |            | 0,010      | 1,81 |
| Гравий – супесь   |            | 0,001      | 1,67 |
| Песок – глина     | 1          | 0,100      | 3,03 |
| Песок – суглинок  |            | 0,010      | 2,83 |
| Песок – супесь    |            | 0,001      | 2,50 |
| Глина – суглинок  | 0,1        | 0,010      | 4,55 |
| Глина – супесь    | 0,1        | 0,001      | 3,96 |
| Суглинок – супесь | 0,01       | 0,001      | 6,06 |

Использование коэффициента  $T$  обусловлено влиянием нескольких типов грунта на точность измерений электромагнитным трассопоисковым приемником. Поскольку практические данные о степени влияния количества переходных зон различной дисперсности отсутствуют, то значения указанного коэффициента, приведенные в табл. 3, следует считать теоретическими.

Таблица 3

Значения коэффициента  $T$ 

| Количество изменений дисперсности в переходной зоне | Значения коэффициента |
|---|-----------------------|
| 1   | 1,00                  |
| 2   | 1,05                  |
| 3   | 1,10                  |
| 4   | 1,15                  |
| 5 и более   | 1,20                  |

**Выводы**

Главной задачей мониторинга технического состояния ППМГ является определение пространственных координат трубопровода и глубины залегания на предмет соответствия проектной документации. Глубину залегания вычисляют как разность отметок поверхности дна и верхней образующей трубы.

На участках, приближенных к плоским и не имеющих множественных или значительных изменений в кривизне поверхности, наилучшим образом показывает себя линейный метод пространственной интерполяции, основанный на построении триангуляцион-

ных поверхностей. В случае более разнообразного рельефа дна рекомендуется применять методы с нелинейной составляющей.

Важно отметить, что чем больше площадь участка ППМГ, тем выше зависимость значения СКП построения ЦМР от пространственного разрешения.

К основным источникам ошибок в показаниях судовых трассоискателей следует отнести влияние изменения дисперсности грунта дна и образование так называемых аномальных зон.

Определение аномальных зон, а также последующая обработка измерений, попавших в данные участки, – необходимый процесс для

увеличения точности результатов. Несмотря на важность работы с подобными измерениями, на данный момент нет общепринятой методики обработки данных, учитывающей влияние погрешностей и грубых ошибок на измерения.

Применение описанного подхода к обработке натурных данных позволит определить местонахождение аномальных зон, уменьшив величину погрешности определения глубины залегания на участках ППМГ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coppard C. et al. Assessment of subsea pipelines // Annual Conference of the Australasian Corrosion Association 2014: Corrosion and Prevention 2014. – Australasian Corrosion Association, 2014.
2. Мурзинцев П. П., Гринь Г. А. Геодезический мониторинг подводных переходов магистральных газопроводов // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 1, ч. 1. – С. 133–136.
3. Antonov A. A. et al. Instrumental methods of examining the underwater crossing of TGPL across the river Lena and evaluating the changes in its stress-strain state // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 20. – P. 270–277. – DOI 10.1016/j.prostr.2019.12.151.
4. Zhang T., Xu X., Xu S. Method of establishing an underwater digital elevation terrain based on kriging interpolation // Measurement. – 2015. – Vol. 63. – P. 287–298.
5. Habib M. et al. Impact of interpolation techniques on the accuracy of large-scale digital elevation model // Open Geosciences. – 2020. – Vol. 12, No. 1. – P. 90–202. – DOI 10.1515/geo-2020-0012.
6. Li L. et al. The effects of DEM interpolation on quantifying soil surface roughness using terrestrial LiDAR // Soil & Tillage Research. – 2020. – Vol. 198. – P. 104520.
7. Pavlova A. I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models // Opto-electronics, Instrumentation and Data Processing. – 2017. – Vol. 53, No. 2. – P. 171–177.
8. Корнилов Ю. Н., Кулеш В. В. Применение методов лазерного сканирования при анализе геометрических параметров поверхностей объекта // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 334–337.
9. Кольцов П. В. Методика безотражательных наблюдений за деформируемыми участками бортов карьеров и отвалов // Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 65–69.
10. Нестеренко Е. А. Способ планирования маркшейдерско-геодезических съемок отвалов и складов лазерно-сканирующими системами // Записки Горного института. – 2011. – Т. 190. – С. 292–296.
11. Нестеренко Е. А. Рациональное применение лазерно-сканирующих систем // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 344–348.
12. Habib M. Evaluation of DEM interpolation techniques for characterizing terrain roughness // Catena. – 2021. – Vol. 198. – DOI 10.1016/j.catena.2020.105072.
13. Bui L. K., Glennie C. L., Hartzell P. J. Rigorous Propagation of LiDAR Point Cloud Uncertainties to Spatially Regular Grids by a TIN Linear Interpolation // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. Vol. 19. – DOI 10.1109/LGRS.2021.3134587.
14. Boreggio M., Bernard M., Gregoret C. Evaluating the differences of gridding techniques for digital elevation models generation and their influence on the modeling of stony debris flows routing: A case study from rovina di cancia basin (North-eastern Italian alps) // Frontiers in Earth Science. – 2018. – Vol. 6. – P. 89. – DOI 10.3389/feart.2018.00089.
15. Ajvazi B., Czimmer K. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo // Geodesy and Cartography. – 2019. – Vol. 45, No. 1. – P. 43–48.
16. Thompson D. et al. MBARI mapping AUV operations: In the Gulf of California // OCEANS 2012 – MTS/IEEE: Harnessing the Power of the Ocean. – 2012. – DOI 10.1109/oceans.2012.6404882.
17. Гринь Г. А., Мурзинцев П. П. Геодезический мониторинг подводных переходов трубопроводов на территории Западной Сибири // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 1, ч. 1. – С. 150–156.
18. РД 51-3-96. Регламент по техническому обслуживанию подводных переходов магистральных газопроводов через водные преграды – 70 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.teh-lit.ru/1lib\\_norma\\_doc/53/53482/index.htm](http://www.teh-lit.ru/1lib_norma_doc/53/53482/index.htm) (дата обращения: 10.09.2022).
19. СТО Газпром 2-2.3-1059-2016. Комплексное техническое диагностирование подводных переходов подводных переходов магистральных газопроводов. – М. : ООО «Газпром экспо». – 189 с.
20. Wilson M. F. J. et al. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope // Marine Geodesy. – 2007. – Vol. 30, No. 1–2. – P. 3–35.

21. Heritage G. L. et al. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality // *Geomorphology*. – 2009. – Vol. 112, No. 3–4. – P. 334–344.
22. Ikechukwu M. N. et al. Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study // *Journal of Geographic Information System*. – 2017. – Vol. 09, No. 03. – P. 354–371.
23. Chen C., Yue T. A method of DEM construction and related error analysis // *Computational Geosciences*. – 2010. – Vol. 36, No. 6. – P. 717–725.
24. Takahashi A., Oguchi T., Sugimori H. Effects of digital elevation model resolution on topographic representation: A case study in the Tama area, western Tokyo // *Geographical Review of Japan*. – 2003. – Vol. 76, No. 11. – P. 800–818.
25. Arun P. V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. – 2013. – Vol. 16, No. 2. – P. 133–139.
26. Guo Q. et al. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 76, No. 6. – P. 701–712.
27. McRoberts R. E. et al. Using genetic algorithms to optimize k-Nearest Neighbors configurations for use with airborne laser scanning data // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 184. – P. 387–395.
28. Majdisova Z., Skala V. Big geo data surface approximation using radial basis functions: A comparative study // *Computational Geosciences*. – 2017. – Vol. 109. – P. 51–58.
29. Pouderoux J. et al. Adaptive hierarchical RBF interpolation for creating smooth digital elevation models // *GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*. – Association for Computing Machinery (ACM), 2004. – P. 232–240.
30. Нестеренко Е. А. Возможность использования сплайн-поверхности для построения поверхностей по результатам съемок // *Записки Горного института*. – 2013. – Т. 204. – С. 127–133.

### Об авторах

*Мурат Газизович Мустафин* – доктор технических наук, зав. кафедрой инженерной геодезии.

*Никита Сергеевич Павлов* – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии.

*Вячеслав Александрович Вальков* – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии.

*Богдан Юрьевич Васильев* – аспирант кафедры инженерной геодезии.

Получено 20.10.2022

© М. Г. Мустафин, Н. С. Павлов, В. А. Вальков, Б. Ю. Васильев, 2023

## Diagnosics and identification of anomalous zones of trunk pipelines at underwater crossings using digital elevation model

*M. G. Mustafin<sup>1</sup>, N. S. Pavlov<sup>1</sup>, V. A. Valkov<sup>1</sup>, B. Yu. Vasiliev<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* e-mail: Vasilev\_BYu2@pers.spmi.ru

**Abstract.** The article considers the issues of geodetic support for monitoring the technical condition of main gas pipelines underwater crossings (MGPUС). The purpose of the research is to increase the accuracy of determining the depth of the gas pipeline underwater crossings of main gas pipelines by taking into account the zones of faulty location of the pipeline (anomalous zones) and the bottom surface above MGPUС. The main problem of determining the technical condition of the gas pipeline underwater crossing is the difficulty of determining the depth of the gas pipeline due to the influence of external factors (soil, constructions and communications) on the measuring equipment (underwater trace detectors). The study indicates the accuracy of building digital elevation models (DEM) of the bottom, from which the calculation of the protective roll over the gas pipeline, which affects the determination of the technical state, and the causes of anomalous zones, as well as the ways of their determination. The variants of increasing the accuracy of calculating the depths of the gas pipeline location taking into account the DEM data are studied. The approach to definition of the method of spatial interpolation for construction of the bottom DEM according to the echolocation data depending on the surface curvature changes is offered. The authors note the interrelation of determining the criterion of technical condition of under-water crossing with the accuracy of DEM construction and determination of

the spatial position of the pipeline. The proposed approaches are aimed at reducing the influence of the systematic part of the error and increasing the accuracy of the depth of occurrence, which is an urgent task.

**Keywords:** DEM, point cloud, spatial interpolation methods, mean square error, kriging, radial basis function, natural neighbor, nearest neighbor, triangulation, minimum curvature, underwater crossings of gas pipelines, hydrographic survey

## REFERENCES

1. Coppard, C., & et al. (2014). Assessment of subsea pipelines. *Annual Conference of the Australasian Corrosion Association 2014: Corrosion and Prevention 2014*. Australasian Corrosion Association.
2. Murzintsev, P. P., & Grin, G. A. (2006). Geodesic monitoring of underwater crossings of main gas pipelines. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2006: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2006: Vol. 1, Part 1]* (pp. 133–136). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Antonov, A. A., & et al. (2019). Instrumental methods of examining the underwater crossing of TGPL across the Lena River and evaluating the changes in its stress-strain state. *Procedia Structural Integrity*, 20, 270–277. doi: 10.1016/j.prostr.2019.12.151.
4. Zhang, T., Xu, X., & Xu, S. (2015). Method of establishing an underwater digital elevation terrain based on kriging interpolation. *Measurement*, 63, 287–298.
5. Habib, M., & et al. (2020). Impact of interpolation techniques on the accuracy of large-scale digital elevation model. *Open Geosciences*, 12(1), 90–202. doi: 10.1515/geo-2020-0012.
6. Li, L., & et al. (2020). The effects of DEM interpolation on quantifying soil surface roughness using terrestrial LiDAR. *Soil & Tillage Research*, 198, P. 104520.
7. Pavlova, A. I. (2017). Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. Allerton Press Incorporation*, 53(2), 171–177.
8. Kornilov, Yu. N., & Kulesh, V. V. (2012). Application of laser scanning methods in the analysis of geometric parameters of object surfaces. *Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]*, 199, 334–337 [In Russian].
9. Koltsov, P. V. (2012). Methods of reflection-free observations of the deformed sections of the sides of quarries and waste dumps. *Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]*, 198, 65–69 [in Russian].
10. Nesterenko, E. A. (2011). Method of planning the surveyor-geodesic surveys of waste dumps and stockpiles by laser-scanning systems. *Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]*, 190, 292–296 [in Russian].
11. Nesterenko, E. A. (2012). Rational application of laser-scanning systems. *Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]*, 199, 344–348 [in Russian].
12. Habib, M. (2021). Evaluation of DEM interpolation techniques for characterizing terrain roughness. *Catena*, 198, P. 105072. doi:10.1016/j.catena.2020.105072.
13. Bui, L. K., Glennie, C. L., Hartzell, P. J. (2022). Rigorous Propagation of LiDAR Point Cloud Uncertainties to Spatially Regular Grids by a TIN Linear Interpolation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters: Vol. 19*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/LGRS.2021.3134587.
14. Boreggio, M., Bernard, M., & Gregoretti, C. (2018). Evaluating the differences of gridding techniques for digital elevation models generation and their influence on the modeling of stony debris flows routing: A case study from rovina di cancia basin (North-Eastern Italian alps). *Frontiers in Earth Science*, 6, P. 89. doi: 10.3389/feart.2018.00089.
15. Ajvazi, B., & Czimmer, K. (2019). A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo. *Geodesy and Cartography*, 45(1), 43–48.
16. Thompson, D., & et al. (2012). MBARI mapping AUV operations: In the Gulf of California. OCEANS 2012 – MTS/IEEE: Harnessing the Power of the Ocean. doi: 10.1109/oceans.2012.6404882.
17. Grin, G. A., & Murzintsev, P. P. (2008). Geodesic Monitoring of Subsea Pipeline Crossings in Western Siberia. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2008: T. 1, ch. 1. [Proceedings of GEO-Siberia-2008: Vol. 1, Part 1]* (pp. 150–156). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
18. Ruling Document. RD 51-3-96. Regulations for Maintenance of Underwater Crossings of Main Gas Pipelines through Water Barriers. Retrieved from [http://www.tehlit.ru/1lib\\_norma\\_doc/53/53482/index.htm](http://www.tehlit.ru/1lib_norma_doc/53/53482/index.htm) (accessed September 10, 2022) [in Russian].
19. STO Gazprom 2-2.3-1059-2016. Comprehensive technical diagnostics of underwater underwater crossings of main gas pipelines. Moscow: OOO "Gazprom Expo" Publ., 189 p. [in Russian].

20. Wilson, M. F. J., & et al. (2007). Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, 30(1-2), 3–35.
21. Heritage, G. L., & et al. (2009). Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology*, 112(3-4), 334–344.
22. Ikechukwu, M. N., & et al. (2017). Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study. *Journal of Geographic Information System. Scientific Research Publishing, Inc.*, 09(03), 354–371.
23. Chen, C., & Yue, T. (2010). A method of DEM construction and related error analysis. *Computational Geosciences*, 36(6), 717–725.
24. Takahashi, A., Oguchi, T., & Sugimori, H. (2003). Effects of digital elevation model resolution on topographic representation: A case study in the Tama area, western Tokyo. *Geographical Review of Japan*, 76(11), 800–818.
25. Arun, P. V. (2013). A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(20), 133–139.
26. Guo, Q., & et al. (2010). Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(6), 701–712.
27. McRoberts, R. E., & et al. (2016). Using genetic algorithms to optimize k-Nearest Neighbors configurations for use with airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*, 184, 387–395.
28. Majdisova, Z., & Skala, V. (2017). Big geo data surface approximation using radial basis functions: A comparative study. *Computational Geosciences*, 109, 51–58.
29. Pouderoux, J., & et al. (2004). Adaptive hierarchical RBF interpolation for creating smooth digital elevation models. *GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems* (pp. 232–240). Association for Computing Machinery (ACM).
30. Nesterenko, E. A. (2013). The possibility of using the spline-surface to build surfaces based on the results of surveys. *Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]*, 204, 127–133 [in Russian].

#### Author details

*Murat G. Mustafin* – D. Sc., Head of the Department of Engineering Geodesy.

*Nikita S. Pavlov* – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy.

*Vyacheslav. A. Valkov* – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy.

*Bogdan Yu. Vasiliev* – Ph. D. Student of the Department of Engineering Geodesy.

Received 20.10.2022

© M. G. Mustafin, N. S. Pavlov, V. A. Valkov, B. Yu. Vasiliev, 2023