

UDC 622.323

DOI 10.52171/herald.243

## **Increasing the Accuracy of Assessment of Soil Subsidence for the Safe Processing of Pipelines**

**R.A. Eminov,** **S.B. Mammadova, X.E. Aliyarova**

*Azerbaijan State University of Oil and Industry (Baku, Azerbaijan)*

### **For correspondence:**

Xalida Aliyarova / e-mail: aliyarova1976@bk.ru

### **Abstract**

It is shown that monitoring of soil subsidence in pipeline laying zones is a necessary measure to ensure its safe operation, and the widespread use of differential interferometric aperture radars (InSAR) for these purposes is noted. It has been established that such components of the InSAR radio wave delay as hydrostatic  $\Delta L_{\text{hyd}}$  and wet  $\Delta L_{\text{wet}}$  delays can be minimized by ensuring a certain pattern of relationship between the indicators of height  $H$  and geographic latitude  $\varphi$  of the surface. A condition is determined for ensuring joint minimization of the components  $\Delta L_{\text{hyd}}$  and  $\Delta L_{\text{wet}}$  while ensuring a single relationship between  $H$  and  $\varphi$ .

**Keywords:** soil subsidence, groundwater, pipeline, error, signal delay.

**Submitted** 31 Oct 2024

**Published** 17 Mar 2025

### **For citation:**

R.A. Eminov, S.B. Mammadova, X.E. Aliyarova

[Increasing the Accuracy of Assessment of Soil Subsidence for the Safe Processing of Pipelines]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (1), pp. 51-57

## Boru kəmərlərinin təhlükəsiz işlənməsi üçün qrunut çökməsinin qiymətləndirmə dəqiqliyinin artırılması

R.Ə. Eminov, S.B. Məmmədova, X.E. Əliyeva

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)

### Xülasə

Göstərilmişdir ki, boru kəmərlərinin salınması zonasında çökən qrunutlara nəzarət məsələsi kimi onun təhlükəsiz işlənməsini təmin edən vacib tədbirlərdən biri kimi bu məqsədlərlə differensial interferometrik apertur (İnSAR) radarlarından geniş istifadə hesab olunur. Qeyd olunur ki, İnSAR radiodalğasının  $\Delta L_{hyd}$  və rütubətli  $\Delta L_{wet}$  gecikmə komponentləri minimuma endirilə bilər, əgər yer ərazisinin  $H$  yüksəklik və  $\varphi$  coğrafi en dairəsinin göstəriciləri arasındakı qarşılıqlı əlaqənin olmasının qanunauyğunluğunu təmin etsək.  $H$  və  $\varphi$  arasındakı qarşılıqlı əlaqənin olmasını təmin etdikdə,  $\Delta L_{hyd}$  və  $\Delta L_{wet}$  komponentlərin birgə minimizasiyası üçün şərtlər müəyyən olunub.

**Açar sözlər:** torpağın çökməsi, yeraltı sular, boru kəməri; səhv, signal gecikməsi.

## Повышение точности оценки просадки грунта для безопасного функционирования трубопроводов

Р.А. Эминов, С.Б. Мамедова, Х.Э. Алиева

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности  
(Баку, Азербайджан)

### Аннотация

Показано, что контроль просадки грунта в зонах прокладки трубопровода является необходимым мероприятием для обеспечения его безопасного функционирования, и отмечено широкое использование в этих целях дифференциальных интерферометрических апертурных радаров (InSAR). Установлено, что такие компоненты задержки радиоволны InSAR, как гидростатическая  $\Delta L_{hyd}$  и влажная  $\Delta L_{wet}$  задержки, могут быть минимизированы при обеспечении определенной закономерности взаимосвязи между показателями высоты  $H$  и географической широты  $\varphi$  поверхности. Определено условие обеспечения совместной минимизации компонентов  $\Delta L_{hyd}$  и  $\Delta L_{wet}$  при обеспечении единой взаимосвязи между  $H$  и  $\varphi$ .

**Ключевые слова:** просадка грунта, грунтовые воды, трубопровод, погрешность, задержка сигнала.

## Введение

Просадка грунта является глобальной проблемой. Например, в США в 45 штатах просадке были подвержены территории площадью более  $44 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>. Основными причинами просадки грунта являются удаление подземных (грунтовых) вод, дренаж органической почвы, образование впадин, подземное шахтное производство, гидроуплотнение, таяние участков вечной мерзлоты, естественная консолидация (сжатие) грунта [1].

В работе [2] отмечается, что экстракция грунтовых вод с водоносного пласта в Шанхае (Китай) началась в 1860 г. На рис.1 показана кривая просадки поверхности грунта в Шанхае по различным реперам, начиная с 1920 г. [2].

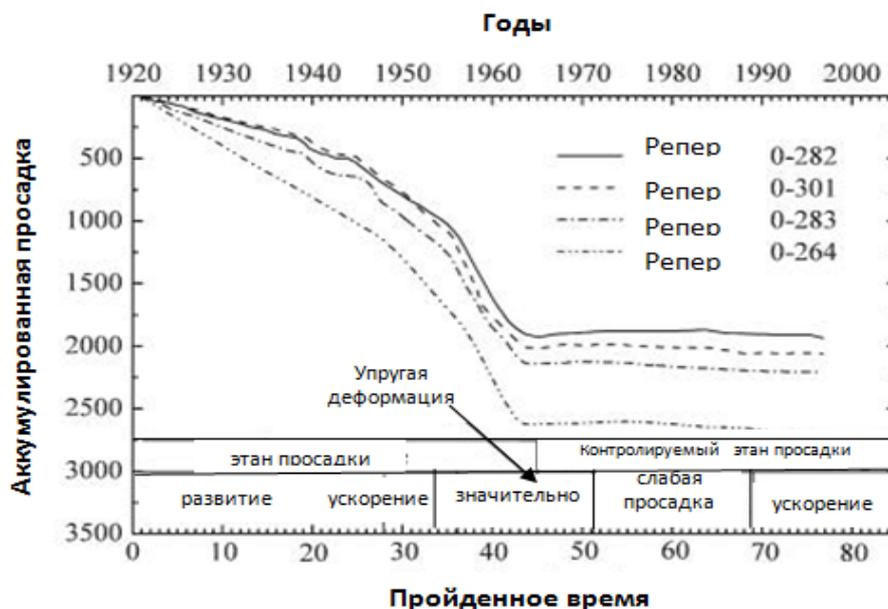
Одной из основных причин просадки грунта является проведение подземных

земляных работ, например строительства станций метрополитена.

В работе [3] показано, что измерения, проводимые радарными С- и L-диапазонами в местечке Нобахреман (Иран) в 2005-2010 гг., позволили обнаружить просадку грунта на >30 см на участке площадью 281 км<sup>2</sup>.

Развитие городов также может стать причиной просадки грунта из-за увеличивающейся нагрузки на пласты [4]. Исследования показали, что в течение 2005-2010 гг. коэффициент корреляции между показателем развития городов и просадкой грунта достигал 0,64...0,8 %.

Как отмечается в работе [4], степень развития городов может быть проконтролирована спутниками DMSР (Оборонная Программа метеорологических спутников (США)).



**Рисунок 1** – Кривые просадки поверхности грунта в Шанхае по различным реперам  
**Figure 1** – Subsidence curves of the soil surface in Shanghai according to various benchmarks

Соответствующие исследования показали, что данные DMSР, соответствующие свечению городов в вечернее и ночное

время, могут быть использованы для оценки морфологии больших городов, характеризующейся такими показателями, как насе-

ление города, площадь застроенных участков, валовой национальный продукт (GDP), потребляемая электроэнергия. Однако очевидно, что такая оценка степени развития городов будет обладать значительной погрешностью из-за влияния изменчивого пропускания атмосферы, зависящего от степени загрязнения воздуха аэрозолями.

Были получены регрессионные уравнения зависимости между суммарной просадкой грунта и  $S$  – полезной жилой площадью построенных домов  $A_s$

$$A_s = 1,32 \cdot 10^{-10} \exp^{S/0,07} - 0,61, \quad (1)$$

а также между суммарной длиной дорог городского метрополитена  $L$  и  $S$ :

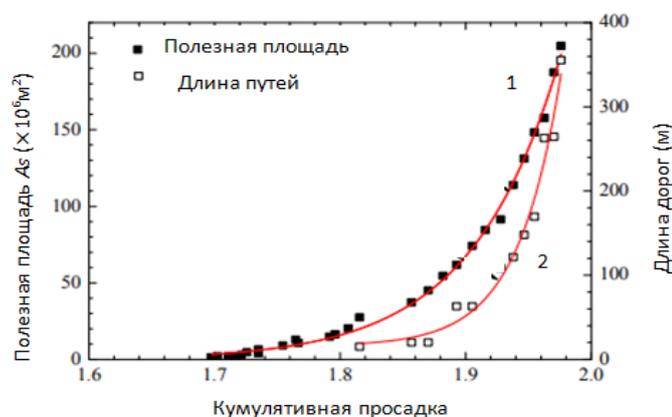
$$L = 4,48 \cdot 10^{-23} \exp^{S/0,03} + 15,74 \quad (2)$$

Кривые для регрессионных зависимостей (1) и (2) показаны на рис.2.

## Постановка задачи повышения точности оценки просадки грунта

Как было показано в работе [5], дифференциальные интерферометрические синтетические апертурные радары (InSAR) позволяют генерировать пространственные карты просадки грунта высокого разрешения с помощью временной серии формируемых SAR-изображений.

Спутниковые синтетические апертурные радары SAR позволяют формировать изображения участков с площадью нескольких сот квадратных километров с достаточной для исследования просадки грунта точностью. В настоящее время такую функцию может успешно выполнять функционирующая пара спутников типа "Sentinel-1" оснащенных SAR.



**Рисунок 2** – Кривые регрессионных зависимостей: 1 – между полезной площадью и кумулятивной просадкой; 2 – между длиной путей и кумулятивной просадкой

**Figure 2** – Curves of regression dependencies: 1 – between usable area and cumulative subsidence; 2 – between track length and cumulative subsidence

Вместе с тем интерферограммы, получаемые в результате обработки данных этих спутников, могут содержать определённую погрешность, вызванную задержкой распространения радиоволн в атмосфере. В целом, суммарная атмосферная

задержка сигнала  $\Delta L_{tot}$  может быть определена следующим образом [6]:

$$\Delta L_{tot} = \frac{1}{\cos \alpha} (\Delta L_{hyd} + \Delta L_{wet} + \Delta L_{liq}) \quad (3)$$

где  $\Delta L_{hyd}$  – гидростатическая задержка;  $\Delta L_{wet}$  – влажная задержка;  $\Delta L_{liq}$  – жидкостная задержка.

При этом, согласно [7], сухой воздух воздействует на гидростатическую задержку, а водяные пары являются причиной появления влажной компоненты задержки. Жидкостная компонента образуется из-за облаков и водяных капель и легко может быть учтена.

Гидростатическая компонента определяется по формуле:

$$\Delta L_{\text{hyd}} = 10^{-6} k_1 \frac{R_d}{g_m} P_h, \quad (4)$$

где  $k_1$  – показатель рефракции и воздуха;  $R_d$  – универсальная газовая постоянная;  $g_m$  – ускорение свободного падения, определяемое по формуле:

$$g_m = 97,84(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,000284H) \quad (5)$$

где  $\varphi$  – географическая широта;  $H$  – высота поверхности местности в км.

Влажная компонента атмосферной задержки определяется как [7]:

$$\Delta L_{\text{wet}} = 10^{-6} \frac{(k_2 T_m + k_3) R_d e_a}{T_0 (g_m (\gamma + 1) - \beta R_d)} \cdot k_{\text{wet}} \quad (6)$$

где  $k_2, k_3, \beta$  – постоянные величины;  $e_a$  – фактическое давление водяных паров;  $T_0$  – температура земной поверхности, К;  $\gamma$  – сезонный коэффициент, изменяющийся в пределах (2,92...3,04);  $T_m, k_{\text{wet}}$  определяются по формулам:

$$T_m = T_0 \left( 1 - \frac{\beta R_d}{g_m (\gamma + 1)} \right), \quad (7)$$

$$k_{\text{wet}} = \left( 1 - \frac{10^4 \beta}{T_0} \right)^{\frac{g_m (\gamma + 1)}{\beta R_d} - 1}. \quad (8)$$

Из формул (3)...(8) следует, что существует некоторая возможность уменьшения погрешностей  $\Delta L_{\text{hyd}}$  и  $\Delta L_{\text{wet}}$  изменения расстояний в некотором множестве

точек, формируемом функциональной зависимостью

$$H = H(\varphi). \quad (9)$$

при введении некоторого ограничения на эту функцию в виде

$$\int_0^{\varphi_{\text{max}}} H(\varphi) d\varphi = c; c = \text{const}. \quad (10)$$

Таким образом, сформулирована задача учёта погрешностей в определении просадки грунта, обусловленных задержками, определяемыми уравнениями (4) и (6) с учетом выражения (5).

### Решение задачи

**Анализ возможности уменьшения погрешности  $\Delta L_{\text{hyd}}$ .** С учётом выражений (4) и (5) гидростатическую задержку выразим следующим образом:

$$\Delta L_{\text{hyd}} = \frac{10^{-6} k_2 R_d P_h}{97,84(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00284H)}. \quad (11)$$

С учетом формул (9) и (10) составим целевой интеграл оптимизации:

$$F_1 = \int_0^{2\varphi_{\text{max}}} \frac{a_1}{a_2 [1 - a_3 \cos(2\varphi) - a_4 H(\varphi)]} d\varphi \quad (12)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4 = \text{const}$ .

С учетом выражений (10) и (12) сформируем целевой интеграл безусловной вариационной оптимизации

$$F_2 = \int_0^{2\varphi_{\text{max}}} \frac{a_1}{a_2 [1 - a_3 \cos 2\varphi - a_4 H(\varphi)]} d\varphi - \lambda \left[ \int_0^{2\varphi_{\text{max}}} H(\varphi) d\varphi - c \right], \quad (13)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Следует отметить, что аналогичная задача была решена в [8] согласно уравнению Эйлера-Лагранжа. Решение оптимизации

ционной задачи (13) должно удовлетворить условию

$$\frac{d\left\{\frac{a_1}{a_2[1-a_3 \cos 2\varphi - a_4 H(\varphi)]} - \lambda H(\varphi)\right\}}{dH(\varphi)} = 0. \quad (14)$$

Решение оптимизационной задачи, обеспечивающей минимум  $F_2$ , получено в виде:

$$H(\varphi) = 1 - a_3 \cos(2\varphi) - \sqrt{\frac{a_1 a_4}{\lambda_0 a_2}} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{wet}} &= 10^{-6} \left[ \left( \frac{(k_2 T_m + k_3) R_d e_a}{T_0 (g_m (\gamma + 1) - \beta R_d)} \right) \right] k_{\text{wet}} = \\ &= 10^{-6} \left[ \frac{(k_2 T_m + k_3) R_d e_a}{T_0 [97,84(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,0028H)(\gamma + 1) - \beta R_d]} \right] k_{\text{wet}} = \frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos(2\varphi) - b_4 H\varphi - b_5} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{где } b_1 &= 10^{-6} k_{\text{wet}} (k_2 T_m + k_3) R_d e_a; \\ b_2 &= T_0 \cdot 97,84 (\gamma + 1); \\ b_3 &= T_0 \cdot 97,84 \cdot 0,0026 (\gamma + 1); \\ b_4 &= T_0 \cdot 97,84 \cdot 0,00028 (\gamma + 1); \\ b_5 &= T_0 \cdot 97,84 \cdot \beta R_d \end{aligned}$$

Целевой функционал оптимизации  $F_3$ , аналогичный (12), имеет вид:

$$F_3 = \int_0^{2\varphi_{\text{max}}} \left[ \frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos 2\varphi - b_4 H\varphi - b_5} \right] d\varphi. \quad (17)$$

Целевой функционал безусловной вариационной оптимизации  $F$  имеет вид:

$$F_4 = \int_0^{2\varphi_{\text{max}}} \left[ \frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos 2\varphi - b_4 H\varphi} \right] d\varphi - \lambda \int_0^{2\varphi_{\text{max}}} [H(\varphi) d\varphi]. \quad (18)$$

Аналогично (14), решение рассматриваемой оптимизационной задачи минимизации функционала (18) должно удовлетворить условию

$$\frac{d\left\{\frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos 2\varphi - b_4 H\varphi} - \lambda H(\varphi)\right\}}{dH(\varphi)} = 0. \quad (19)$$

где  $\lambda_0$  – вычисленное значение  $\lambda$  с учетом выражений (10) и (14).

Можно показать, что при решении (15)  $F_2$  достигает минимальной величины, т.е. интегрированная гидростатическая задержка достигает минимальной величины [9].

**Анализ возможности уменьшения погрешности  $\Delta L_{\text{wet}}$ .** С учетом выражений (5) и (6) получим:

Решение оптимизационной задачи получено в виде

$$H(\varphi) = \frac{b_2}{b_4} - \frac{b_3 \cos 2\varphi}{b_4} - \sqrt{\frac{b_1}{b_4 \lambda_0}}, \quad (20)$$

где  $\lambda_0$  – значение  $\lambda$ , вычисленное с учетом (10) и (19).

Также можно показать, что при решении (20) функционал цели (18) достигает минимума.

### Заключение

Анализ показывает, что для обеспечения безопасности функционирования трубопроводов необходимо контролировать просадку грунта в зонах их прокладки. Для такого контроля в настоящее время широко используются интерферометриче-

ские радары с синтетической апертурой. Погрешность функционирования этих устройств связана с общей задержкой распространения радиосигнала, имеющей, в частности, такие компоненты, как гидростатическая задержка и влажная задержка.

В результате проведенного исследования получены выражения для оптимальной взаимосвязи показателей  $H$  и  $\varphi$  в исследуемой зоне, при реализации которых обеспечивается минимальное значение соответствующей компоненты общей задержки.

С учетом выражений (15) и (20) можно заключить, что при выполнении условий может быть достигнута совместная минимизация компонентов  $\Delta L_{\text{hyd}}$  и  $\Delta L_{\text{wet}}$ .

Итак, контроль просадки грунта в зонах прокладки трубопроводов является необходимым мероприятием для обеспечения их безопасного функционирования. Компоненты задержки радиоволны InSAR как  $\Delta L_{\text{hyd}}$  и  $\Delta L_{\text{wet}}$  могут быть минимизированы при обеспечении определенной закономерности взаимосвязи между величинами  $H$  и  $\varphi$ . Может быть обеспечена совместная минимизация компонентов  $\Delta L_{\text{hyd}}$  и  $\Delta L_{\text{wet}}$  при обеспечении определенной взаимосвязи показателей  $H$  и  $\varphi$ .

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## REFERENCES

1. **Galloway D.L., Bawden G.W., Leake S.A., Honegger D.G.** Land subsidence hazards. Chapter 2. Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines// U. S. Geological Survey Open – File Report. 2008. Vol. 1164. P. 32 – 105.
2. **Shen S. L., Xu Y. S.** Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai // Canadian Geotechnical Journal. 1 September 2011.
3. **Mahdavian A. A., Hassanshahia J.** Quantifying geotechnical changes in the Rafsanjan plain in times series and finding out their causes using radar remote sensing techniques// EJGE. 2019. Vol. 24. Bundo 4.
4. **Jiao S., Yu J., Wang Y., Zhu L., Zhou Q.** Estimating the impact of urban expansion on land subsidence using time series of DMSP night-time satellite imagery. The Intern Archives of the Photogrammetry// Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS TC III Mid-term Symposium Developments. Technologies and Application in Remote Sensing. 7-10 May. 2018. Beijing. China. Vol. XLII-3.
5. **Xu Y. S., Shen S. L., Ren D. J., Wu H. N.** Analysis of factors in land subsidence in Shanghai: A view based on a strategic environmental assessment// 2016. Vol. 573. No. 8.
6. **Maasonet D, Feigl K.L.** Radar interferometry and its application to changes in the Earth' surface// Reviews of Geophysic. 1998. Vol. 36(4). P. 441 – 500.
7. **Ahmad W., Choi M., Kim S., Kim D.** Detection of land subsidence and its relationship with land coves types using ESA Sentinel satellite data: a case study of Quetta Valley, Pakistan// Intern of Remote Sensing.
8. **Mehdiyev A. Sh., Eminov R. A., Ismayilov N.Y., Asadov H.H.** Research of impact of geographical latitude and residual ionospheric noises on in formativeness of measuring of zenith wet delay GPS signals// Positioning. 2015. Vol. 6. P. 44 – 48.
9. **Eminov R.Ə.** Yağışın GPS siqnallarının troposfer gecikməsinə etdiyi təsirinə qiymətləndirilməsi. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri. Bakı, 2021, Cild 13, № 2, s. 101-106.