

# ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ОБУСТРОЙСТВА МОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕЛЯЦИИ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Л. В. Муравьева<sup>1</sup>, И. Г. Овчинников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## FEATURES OF THE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PIPELINES FOR THE DEVELOPMENT OF AN OFFSHORE FIELD USING THE CORRELATION OF SEISMIC IMPACT DATA

Liudmila V. Muravieva<sup>1</sup>, Igor G. Ovchinnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

<sup>2</sup>Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** На морских платформах для регистрации землетрясений устанавливают сейсмодатчики. Для обслуживания работы месторождения строят технологические трубопроводы, обеспечению безопасности которых посвящена данная статья. В ней рассматривается анализ данных о сейсмическом событии на основании корреляции сейсмического воздействия, зарегистрированного на платформе. Так как технологические трубопроводы расположены рядом с платформой, то, используя методы статистиче-

**Abstract.** Seismic sensors are installed on offshore platforms for recording earthquakes. Technological pipelines are being built, to service the operation of the field. This article is devoted to ensuring the safety of technological pipelines. It deals with the analysis of data on a seismic event based on the correlation of the seismic impact recorded on the platform. Since the process pipelines are located near the platform, using statistical analysis methods, correlation analysis of data recorded at a distance of about 200 m and using fuzzy logic methods, we

---

ского анализа, анализ корреляции данных, зарегистрированных на расстоянии около 200 м, и методы нечеткой логики, можно получить представление о степени влияния землетрясения на окружающие технологические трубопроводы.

**Ключевые слова:** пространственная изменчивость, кросс-корреляция, математическое ожидание, средний максимальный отклик, двухпролетная балка, грунт, фундаментальный период

### Введение

Разработка морских месторождений связана с опорными буровыми платформами. Бурение скважины осуществляется подвижной буровой установкой, а добытая нефть и природный газ транспортируются по подводным трубопроводам на перерабатывающее предприятие. Одна основная производственная платформа обслуживает множество скважин на достаточно большой площади. Подводные системы обычно используются на глубине 500 м и более и не имеют возможности бурить, а только добывать и транспортировать.

Добыча морских углеводородов оказала значительное воздействие на развитие и разработку морских месторождений (Stantec, 2012), деятельность по добыче углеводородов сосредоточена в таких крупных центрах, как Абердин (Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии), Ставангер (Норвегия), Хьюстон и Новый Орлеан (Соединенные Штаты Америки), Сент-Джонс (Канада). В Норвегии в 2010 году доходы от экспорта сырой нефти, природного газа, трубопроводных транспортных услуг составили около 100 млрд долларов, что равнялось почти половине стоимости всего норвежского экспорта и в 10 раз превышало экспортную стоимость рыбы (Norwegian Petroleum Directorate, 2012).

can have an idea of the degree of impact of the earthquake on the surrounding process pipelines.

**Key words:** spatial variability, cross-correlation, coherence, mean maximum response, two-span beam, soil, fundamental period

Деятельность предприятий морской нефтяной промышленности сопряжена с большими затратами<sup>1</sup>.

В сейсмоопасных районах риск возникновения геопасностей, связанных с землетрясениями, повышается. Настоящее исследование посвящено сейсмическому анализу и проектированию морских трубопроводов ввиду отсутствия соответствующих сейсмических норм<sup>2</sup>. Наблюдения из близко расположенных сейсмографических массивов с конца 1970-х годов показали, что сейсмические наземные акселерограммы, сделанные в различных местах в пределах размеров крупных инженерных сооружений, существенно отличаются друг от друга. Это способствовало развитию исследований в данной области, стали доступны записи из расширенных сейсмических массивов типа SMART-1 (рис. 1).

### Результаты/обсуждение

Сейсмические волны воздействуют на протяженное сооружение по мере их прибытия к нему. В стандартной инженерной практике и правилами проектирования предполагается, что при землетрясении движение грунта равномерно на всех опорах сооружения, и оно связано с бесконечным значением скорости сейсмической волны. Сейсмические волны прибывают

---

<sup>1</sup>Offshore technology report OTO 2000 026 Appraisal of RP 2FPS : health and safety executive (recommended practice for planning, designing and constructing floating production systems) ; prepared by engineering limited for the health and safety executive. – United Kingdom, 2000. – 38 p. – Direct text.

<sup>2</sup>ISO 19901-2:2004 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 2 : Seismic design procedures and criteria. – 2012. – 65 p. – Direct text.

в разные места на морском дне одновременно, то есть информация о запаздывании, сдвиге фаз между различными опорами сооружения не учитывается.

В зависимости от расположения различных частей конструктивной системы сооружения они могут реагировать асинхронно с большими реакциями смещения. Это явление называется пространственной вариацией движения землетрясения (SVEGM) [1–5]. Значимость SVEGM была признана еще в 1980-х годах, когда стали доступны записи с морских сооружений, расположенных близко друг к другу (около 200 м).

Эффекты SVEGM (как горизонтальные, так и вертикальные движения) вызывают не только изгиб конструкций, но и оказывают значительное крутильное воздействие между основными плоскостями пространственной конструкции.

Сейсмодатчики на морском месторождении устанавливаются только на платформе. Расчет

сейсмоопасности технологических трубопроводов, подводимых к платформе, возможен на основании использования взаимосвязи (корреляции) всех полученных сейсмоданных. Выявленная зависимость (корреляция) позволяет учесть влияние сейсмического события на подводящие к морской платформе технологические трубопроводы.

Представим метод учета взаимозависимости сейсмограмм для анализа частоты (безопасности) технологического трубопровода обустройства морского месторождения.

На разных стадиях, в различных опорных точках в течение периода времени прибытия сейсмических движений изменяются амплитуда, частотное содержание в зависимости от расстояния между опорными точками, грунтовыми условиями, сейсмические движения усиливаются внефазовыми смещениями в грунте при различных значениях времени.

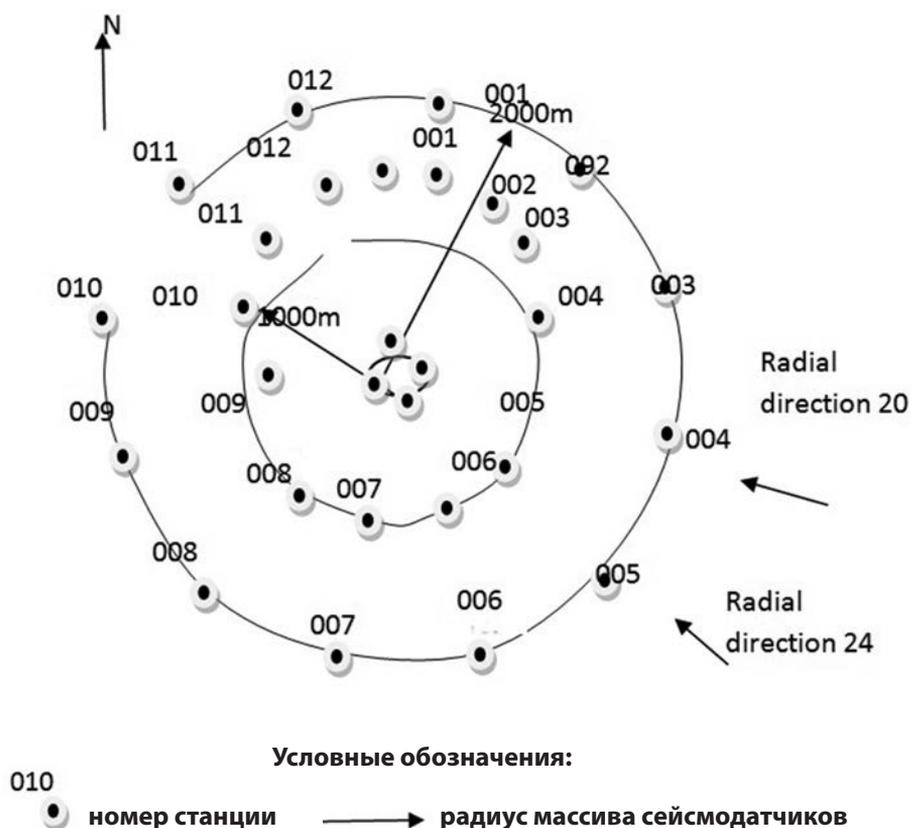


Рис. 1. Массив сейсмодатчиков морских сооружений SMART-1 [7]

Средство для оценки степени линейности связи входных и выходных сигналов дает нам функция когерентности движения грунта. Взаимосвязь сигналов математически определяется корреляцией данных. Учет корреляции выполняется по соотношению:

$$K_{xy} = \sum_i \sum_j (x_i - m_x)(y_i - m_y) p_{ij}$$

для

$$y, j = 0, \pm 1, \pm 2,$$

где  $m_x, m_y$  – математическое ожидание массивов случайных величин  $X$  и  $Y$ ,

$x_i, y_i$  – случайные значения,

$p_{ij}$  – вероятность того, что система из массивов  $X$  и  $Y$  примет значения  $(x_i, y_i)$ , а суммирование распространяется по всем возможным значениям случайных величин  $X, Y$ .

Общую форму комплексной функции когерентности между двумя точками расположения  $A$  и  $B$  на частоте  $\omega$  можно определить как:

$$\begin{aligned} \gamma_{AB}(\omega) &= |\gamma_{AB}| e^{i\Theta_{AB}} = \\ &= S_{AB}(\omega) / [S_A(\omega) S_B(\omega)]^{1/2}, \end{aligned}$$

где  $|\gamma_{AB}|$  – модуль функции когерентности,  $|\gamma_{AB}(\omega)|$  обозначается как потеря когерентности или запаздывающая когерентность,

$i$  – мнимая единица,

$\Theta_{AB}$  представляет собой фазу функции когерентности,

$S_{AB}(\omega)$  – кросс-спектральная матрица движения грунта между точками  $A$  и  $B$ ,

$S_A(\omega)$  и  $S_B(\omega)$  – спектральные плотности мощности движения земли вдоль одного и того же направления в точках  $A$  и  $B$  соответственно.

Функция когерентности, как аналог коэффициента корреляции в частотной области, отражает степень линейной взаимосвязи гармонических компонент рассматриваемых процессов. В задачах оценки линейных частотных характеристик ее можно рассматривать как отношение

двух различных оценок квадрата амплитудной характеристики системы, безразмерной функции когерентности, зависимости двух процессов движения грунта по  $X(t)$  и  $Y(t)$ :

$$\begin{aligned} Coh_{XY}(\omega) &= \gamma_{XY}^2(\omega) = \\ &= \frac{|S_{XY}(\omega)|^2}{S_X(\omega) S_Y(\omega)} = \frac{S_{XY}(\omega) S_{XY}^*(\omega)}{S_X(\omega) S_Y(\omega)}. \end{aligned}$$

Большинство функций когерентности основано на записях статистики землетрясений, полученных с сейсмической станции. Значение функции когерентности лежит между двумя крайними случаями, указывающими, что системы либо являются идеально линейными, либо нет. Принимаем во внимание только эффект прохождения волны.

Многие функции связности (когерентности) были предложены Рональдом С. Харичандром [3–6] и другими учеными [7, 8]. Они подсчитали запаздывающие когерентности по данным, записанным на станциях SMART-1 в Тайване во время четырех землетрясений [7]. Функции когерентности получены эмпирическим или полуэмпирическим путем на основании анализа данных, записанных в массиве SMART-1.

Принятие функции когерентности для описания пространственной изменчивости движения грунта имеет ряд недостатков. Важными недостатками являются влияние несогласованности прохождения волны и местное влияние грунтов.

Расчет безопасности конструкции с использованием SVEGM выполняется методами вероятностного моделирования с учетом теории прочности:

$$C(v, f) = S(f) \gamma(v, f) e^{i\phi(v, f)}.$$

Кросс SDF для акселерограмм при  $l$  и  $m$  равен

$$S_{lm}(f) = C(v_{lm}, f),$$

где  $lm$  = расстояние между станциями  $l$  и  $m$ .

Харичандром и Ванмарк [6] предложили сумму двух экспонент для представления функции

когерентности и формулу определения угла когерентности:

$$|(v, f)| = A \exp \left[ \frac{-2v}{\alpha \theta(f)} (1-A+\alpha A) + (1-A) \exp \left[ \frac{-2v}{\theta(f)} (1-A+\alpha A) \right] \right],$$

$$\theta_{ik}(\xi_{ik}, \omega) = -\frac{\omega \cdot (\bar{V}_{app} \cdot \bar{\xi}_{ik})}{|\bar{V}_{app}|^2} = -\frac{\omega \cdot \xi_{ik}^L}{V_{app}},$$

где  $\theta(f) = k[1 + (f/f_0)b] - 1/2$  – частотно-зависимый пространственный масштаб флуктуации.

Известной формой функции отклика  $S(f)$  является спектр Канаи-Таджими (Clough and Penzien) [3]:

$$s(f) = \left[ \frac{1 + 4\xi_g^2 (f/f_g)^2}{[1 - (f/f_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (f/f_g)^2} \right] \cdot \left[ \frac{(f/f_f)^4}{1 - (f/f_f)^2 + 4\xi_f^2 (f/f_f)^2} \right] S_0.$$

Параметры  $\xi_g, f_g, \xi_f, f_f$  управляют формой спектра.  $S_0$  – коэффициент интенсивности,  $\xi_g, f_g$  – «затухание грунта» и «частота грунта» соответственно.

**Анализ реакции конструкции.** В упрощенном нормативном<sup>3</sup> методе проектировщику рекомендуется сначала провести динамический анализ поведения конструкции, вызванного равномерными сейсмическими возбуждениями на основе использованных для моделирования стационарных пространственно-временных историй ускорения:

$$A(t) = A_0 e^{-\mathcal{N}}; \quad \dot{A}(t) = A_0 \mathcal{N} e^{-\mathcal{N}}.$$

Для анализа реакции конструкции по SVEGM доступны три метода: анализ случайных вибра-

ций, метод спектра отклика, анализ во времени. Рассмотрим их особенности (особенности анализа во времени основаны на применении акселерограмм).

**Анализ случайных вибраций.** Преимущество – согласуется с вероятностным моделированием. Входные данные задаются непосредственно в терминах кросс-корреляции SDF. Недостатки – редко используется на практике, включение нестационарных эффектов является громоздким процессом, нелинейный анализ очень сложен.

**Метод спектра отклика.** Включает в себя эффект SVEGM. Преимущества – обычно используется на практике. По своей сути включает нестационарность возбуждения. Недостаток – включает нелинейное поведение.

Кросс-акселерограмма  $S_{lm}(\omega)$  получена из модели SVEGM:

$$S_{lm}(\omega) = S(\omega) \gamma_{lm}(\omega) e^{-i\omega d}.$$

Комплексная когерентность  $\gamma_i(\xi_{ik}, \omega)$  содержит амплитуду и фазовые части для каждого частотного диапазона записи:

$$\gamma_i(\xi_{ik}, \omega) \cdot e^{i\theta_{ik}, \omega}, \quad i = \sqrt{-1}, (f/f_g), (f/f_f),$$

$$\theta_{ik}(\xi_{ik}, \omega) = -\frac{\omega \cdot (\bar{V}_{app} \cdot \bar{\xi}_{ik})}{|\bar{V}_{app}|^2} = -\frac{\omega \cdot \xi_{ik}^L}{V_{app}}.$$

Амплитудная часть (вещественный член, представляющий собой потерю когерентности  $\gamma_{ik}(\xi_{ik}, \omega)$  чаще всего описывается с помощью термина запаздывающая когерентность, является мерой линейной статистики зависимости между двумя процессами. Если его значение равно нулю, то эти процессы полностью независимы друг от друга. Если значение равно единице, то процессы линейно зависимы.

<sup>3</sup>Правила классификации постройки морских подводных трубопроводов. – Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2012. – 283 с. – Текст : непосредственный.

Приведем пример. При обустройстве месторождения Ракушечного должны быть построены следующие подводные межпромысловые трубопроводы:

- многофазный трубопровод Ду 400 мм от ЛСП (ледостойкой стационарной платформы) до ЛСП-2 для транспорта пластовой продукции скважин протяженностью 7,76 км;
- водовод Ду 250 мм от ЛСП-2 до ЛСП для поддержания пластового давления (ППД) протяженностью 7,76 км;
- трубопровод газлифта Ду 150 мм от ЛСП-2 до ЛСП для подачи газлифтного газа протяженностью 7,76 км.

Расположение объектов и трубопроводов приведено на рис. 2. Рассмотрена корреляция записей сейсмического события на двух платформах ЛСП, ЛСП-2. При анализе кросс-

корреляции для обработки анализа временных рядов использовалась компьютерная программа Statistika. Результаты расчетов, выполненных авторами, представлены на рис. 3.

Данные анализа записей сейсмозвездий представлены заказчиком проекта «Обустройство месторождения Ю. Корчагина» [11].

Статистические данные: математическое ожидание, вероятность и коэффициент корреляции соответственно равны:

$$m_x = 0,44, m_y = 0,132278, p_{ij} = 0,14113.$$

Тогда  $K_{xy} = 0,505$ .

Выполнена оценка когерентности участка обустройства месторождения, учтены характеристики грунтов по EN 1998, где  $A, a, k, \omega_0$  и  $b$  приняты<sup>4</sup>:  $A = 0,7362, a = 0,147, k = 520 \text{ м}, \omega_0 = 17,045 \text{ с}^{-1}$  и  $b = 2,78$ , функции когерентности  $\gamma_{ik}(\xi_{ik}, \omega) = 0,265$  и угол когерентности равен  $21,081$  при  $\omega = 17 \text{ с}^{-1}$ .

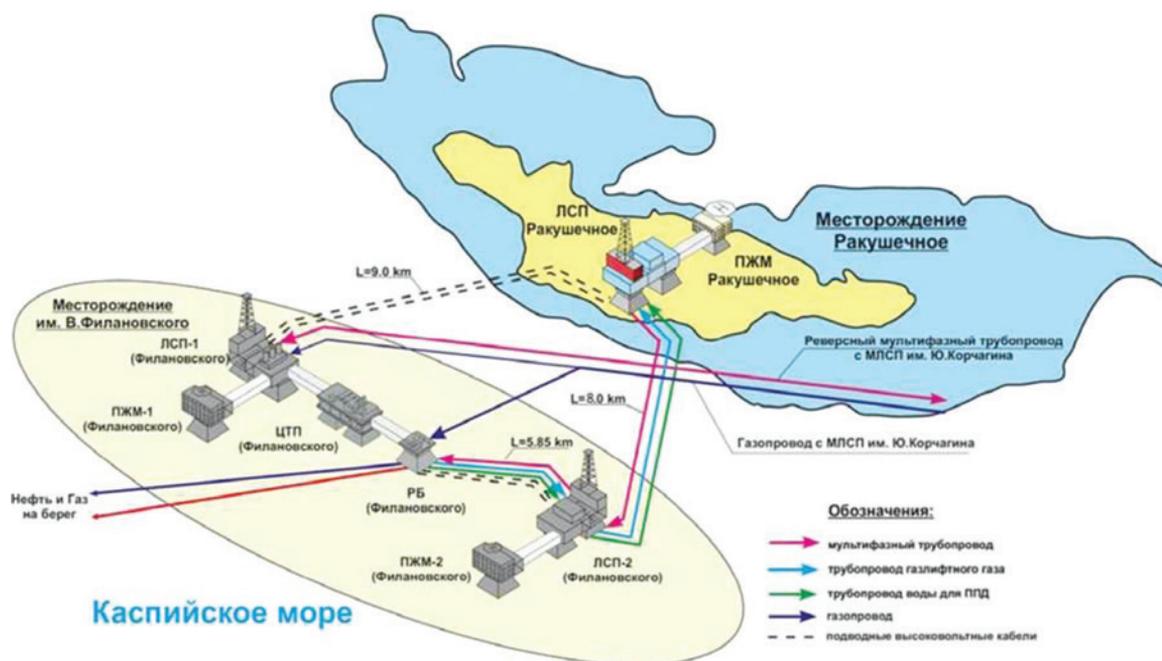


Рис. 2. Общее взаимное расположение объектов обустройства Ракушечного месторождения<sup>5</sup>

<sup>4</sup>Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings [Authority: the European Union per regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. – 2004. – 231 p. – Direct text.

<sup>5</sup>Проект 4250ПН-ОС «Обустройство месторождения Ю. Корчагина» / разработчик ООО «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть». – 2005. – 562 с. – Текст : непосредственный.

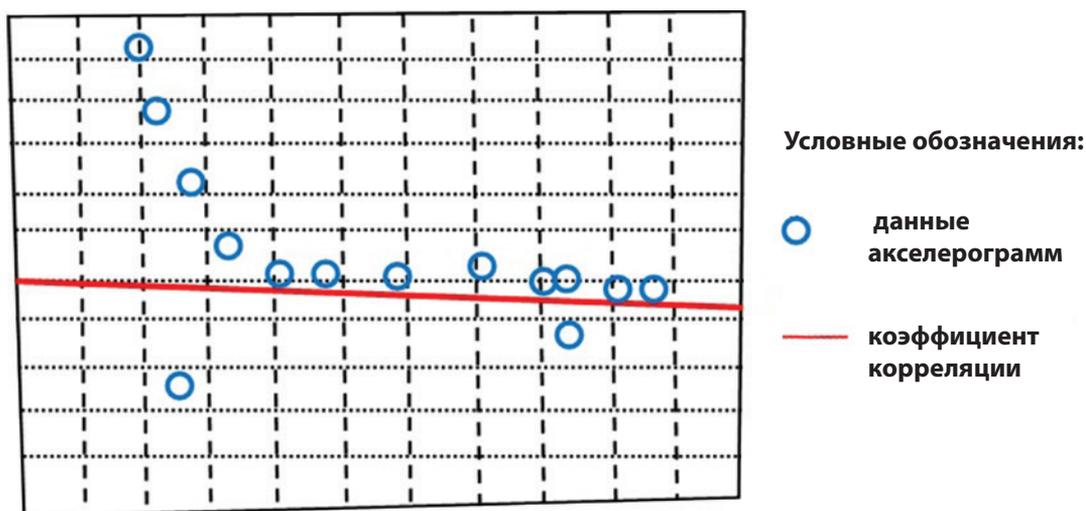


Рис. 3. Расчет коэффициента корреляции проекта обустройства месторождения в программе Statistika

### Заключение

Выявленная зависимость (корреляция) позволяет учесть влияние сейсмического события на подходящие к морской платформе морского месторождения технологические трубопроводы с использованием информации с сейсмодат-

чиков, устанавливаемых только на платформе. Расчет сейсмоопасности технологических трубопроводов, подводимых к платформе, возможен на основании использования взаимосвязи (корреляции) всех полученных сейсмоданных.

### Библиографический список

1. Yao, E. Synthesis of spatially correlated earthquake ground motions based on hilbert transform / Erlei Yao, Yu Miao, Guobo Wang. – DOI: 10.1155/2017/2614769. – Text : electronic // Modelling and Simulation in Engineering. – Hindawi. – Vol. 2017. – P. 9. – URL : <https://downloads.hindawi.com/journals/mse/2017/2614769.pdf>.
2. Bowden, D. C. Earthquake ground motion amplification for surface waves / D. C. Bowden, V. C. Tsai. – DOI: 10.1002/2016GL071885. – Direct text // Geophysical Research Letters. – 2017. – Vol. 44, Iss. 1. – P. 121–127.
3. Lin, J. Non-stationary stochastic earthquake responses of multi-support structures in evolutionary inhomogeneous stochastic fields / J. Lin, J. Li, W. Zhang, F. W. Williams. – Direct text // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 1997. – Vol. 26. – P. 135–145.
4. Baker, J. W. Spectral shape, epsilon and record selection / J. W. Baker, C. A. Cornell. – DOI: 10.1002/eqe.571. – Direct text // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2006. – Vol. 35, Iss. 9. – P. 1077–1095.
5. Jia, J. Modern earthquake engineering offshore and land-based structures / Junbo Jia. – Springer-Verlag GmbH Germany, 2017. – 859 p. – Direct text.
6. Harichandran, R. S. Spatial variation of earthquake ground motion. What is it, how do we model it, and what are its engineering implications? / R. S. Harichandran. – Michigan State University, 1999. – 23 p. – Direct text.

- 
7. Lee, W. H. K. Recent advances in rotational seismology / W. H. K. Lee, H. Igel, M. D. Trifunac. – DOI: 10.1785/gssrl.80.3.479. – Direct text // Seismological Research Letters. – 2009. – Vol. 80(3). – P. 479–490.
  8. Mezouer, N. Importance of spatial variability of seismic ground motion effects on long beams response / N. Mezouer, K. Silhadi, H. Afra. – Direct text // Journal of Civil Engineering and Construction Technology. – 2010. – Vol. 1(1). – P. 1–13. – URL : [https://www.researchgate.net/publication/228884956\\_Importance\\_of\\_spatial\\_variability\\_of\\_seismic\\_ground\\_motion\\_effects\\_on\\_long\\_beams\\_response](https://www.researchgate.net/publication/228884956_Importance_of_spatial_variability_of_seismic_ground_motion_effects_on_long_beams_response).
  9. Zhang, P. Fuzzy damage analysis of the seismic response of a long-distance pipeline under a coupling multi-influence domain / P. Zhang, Y. Wang, G. Qin. – DOI: 10.3390/en12010062. – Text : electronic // Energies. – 2019. – Vol. 12(1). – URL : <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/1/62>.
  10. Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems / S. Rimkevicius, A. Kaliatka, M. Valincius [et al.]. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.01.015. – Direct text // Applied Energy. – 2012. – Vol. 94. – P. 22–33.

### **References**

1. Yao, E., Miao, Yu., & Wang, G. (2017). Synthesis of spatially correlated earthquake ground motions based on hilbert transform. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2017, Pp. 9. (In English). Available at: <https://downloads.hindawi.com/journals/mse/2017/2614769.pdf>. DOI: 10.1155/2017/2614769
2. Bowden, D. C., & Tsai, V. C. (2017). Earthquake ground motion amplification for surface waves. *Geophysical Research Letters*, 1(44), pp. 121–127. (In English). DOI: 10.1002/2016GL071885
3. Lin, J., Li, J., Zhang, W., & Williams, F.W. (1997). Non-stationary stochastic earthquake responses of multi-support structures in evolutionary inhomogeneous stochastic fields. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, (26), pp. 135–145. (In English).
4. Baker, J. W., & Cornell, C. A. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 9(35), pp. 1077–1095. (In English). DOI: 10.1002/eqe.571
5. Jia, J. (2017). *Modern earthquake engineering offshore and land-based structures*. Berlin, Springer-Verlag GmbH Germany Publ, 859 p. (In English).
6. Harichandran, R. S. (1999). *Spatial variation of earthquake ground motion. What is it, how do we model it, and what are its engineering implications?* East Lansing, Michigan State University Publ., 23 p. (In English).
7. Lee, W. H. K., Igel, H., & Trifunac, M. D. (2009). Recent advances in rotational seismology. *Seismological Research Letters*, 80(3), pp. 479–490. (In English). DOI: 10.1785/gssrl.80.3.479
8. Mezouer, N., Silhadi, K., & Afra, H. (2010). Importance of spatial variability of seismic ground motion effects on long beams response. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 1(1), pp. 1–13. (In English). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228884956\\_Importance\\_of\\_spatial\\_variability\\_of\\_seismic\\_ground\\_motion\\_effects\\_on\\_long\\_beams\\_response](https://www.researchgate.net/publication/228884956_Importance_of_spatial_variability_of_seismic_ground_motion_effects_on_long_beams_response).
9. Zhang, P., Wang, Y., & Qin, G. (2019). Fuzzy damage analysis of the seismic response of a long-distance pipeline under a coupling multi-influence domain. *Energies*, 12(1). (In English). DOI: 10.3390/en12010062. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/1/62>
10. Rimkevicius, S., Kaliatka, A., Valincius, M., Dundulis, G., Janulionis, R., Grybenas, A., & Zutautaitė, I. (2012). Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems. *Applied Energy*, (94), pp. 22–33. (In English). DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.01.015

### **Сведения об авторах**

Муравьева Людмила Викторовна, д. т. н., доцент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., e-mail: rfludmia@yandex.ru

Овчинников Игорь Георгиевич, д. т. н., профессор базовой кафедры АО «Мостострой-11», Тюменский индустриальный университет, e-mail: ovchinnikovig@tyuiu.ru

### **Information about the authors**

Liudmila V. Muravieva, Doctor of Engineering, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, e-mail: rfludmia@yandex.ru

Igor G. Ovchinnikov, Doctor of Engineering, Professor at the Base Department JSC «Mostostroy-11», Industrial University of Tyumen, e-mail: ovchinnikovig@tyuiu.ru

**Для цитирования:** Муравьева, Л. В. Особенности расчета технологических трубопроводов устройства морского месторождения с использованием корреляции данных сейсмического воздействия / Л. В. Муравьева, И. Г. Овчинников. – DOI: 10.31660/2782-232X-2021-2-24-32. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 2. – С. 24–32.

**For citation:** Muravieva, L. V., & Ovchinnikov, I. G. (2021). Features of the analysis of technological pipelines for the development of an offshore field using the correlation of seismic impact data. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport* [Architecture, construction, transport], (2), pp. 24-32. (In Russian). DOI: 10.31660/2782-232X-2021-2-24-32.