ISSN 2712-8008
Том / Volume 24 №2 2024
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2024

Применение оптоволоконного мониторинга термометрии при контроле формирования цементного камня в затрубном пространстве скважин

Е.О. Ширяев[1], С.Ф. Анисимова[1], С.В. Галкин[2]

[1]Пермский инженерно-технический центр «Геофизика» (Российская Федерация, 614000, г. Пермь, ул. Петропавловская, 16А)
[2]Пермский национальный исследовательский политехнический университет
(Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

Application of Fiber Optic Thermometry Monitoring in the Control the Formation of Cement Stone in the Well Annulus

Evgeniy O. Shiryaev[1], Svetlana F. Anisimova[1], Sergey V. Galkin[2]

[1]LLC "Perm Engineering and Technical Center "Geophysics" (16A Petropavlovskaya str., Perm, 614000, Russian Federation)
[2]Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 30.11.2023. Принята / Accepted: 31.05.2024. Опубликована / Published: 28.06.2024

Ключевые слова:
оптоволоконный мониторинг, оптоволоконные системы, затрубное пространство скважин, контроль цементирования, распределенное температурное зондирование, ожидание затвердевания цемента.

Перспективным при контроле процесса ожидания затвердевания цемента в скважинах является применение оптоволоконной термометрии скважин (DTS). Метод DTS создает возможность перейти от замеров постфактум к мониторингу в режиме реального времени с выявлением осложненных участков и своевременному принятию необходимых проектных решений. В результате проведенных исследований отработана технология проведения термометрического мониторинга процесса формирования цементного камня. Целью работы является определение применимости наработанных за более чем 10 лет практических навыков в области промыслово-геофизических исследований методом DTS для решения прикладной задачи строительства скважины. Установлено, что полученные по DTS данные, помимо решения прикладных задач (определение температуры реакции, данные о результате цементирования и пр.), позволяют решить задачи контроля процессов, происходящих в затрубном пространстве при формировании цементного камня и создают платформу для дальнейшего развития технологий оперативного реагирования на выявленные осложненные зоны. Результаты выполненной работы могут получить широкое применение при контроле за процессом строительства скважин, а также представляют интерес с точки зрения дальнейшего развития направления как с технологической точки зрения, так и методологически.

Keywords:
fiber optic monitoring, fiber optic systems, well annulus, cementing control, distributed temperature sensing, waiting for cement hardening.

A promising method for monitoring the process of waiting for cement hardening in wells is the use of fiber optic well thermometry or distributed temperature sensing (DTS). The DTS method creates the opportunity to move from post-facto measurements to real-time monitoring with the identification of complicated areas and timely adoption of the necessary design decisions. As a result of the research, the technology for thermometric monitoring of the process of cement stone formation was developed. The purpose of the work was to determine the applicability of practical skills developed over more than 10 years in the field of production geophysical research using the DTS method to solve the applied problem of well construction. It was established that the data obtained from DTS, in addition to solving applied problems (determining the reaction temperature, data on the result of cementing, etc.), made it possible to solve the problems of monitoring the processes occurring in the annulus during the formation of cement stone and create a platform for the further development of technologies for rapid response to identified complicated areas. The results of the work performed can be widely used in monitoring the well construction process, and are also of interest from the point of view of further development, both from a technological point of view and methodologically.

© **Ширяев Евгений Олегович** – заместитель директора по геофизическим и гидродинамическим исследованиям (тел.: +007 (952) 333 94 88; e-mail: Shiriaev.EO@pnsh.ru).
© **Анисимова Светлана Федоровна** – ведущий инженер группы контроля за разработкой центра интерпретации (тел.: +007 (963) 882 20 69; e-mail: Anisimova.SF@pnsh.ru).
© **Галкин Сергей Владиславович** – декан горно-нефтяного факультета, профессор, доктор геолого-минералогических наук (тел.: +007 (342) 219 81 18; e-mail: doc_galkin@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

© **Evgeniy O. Shiryaev** (Author ID in Scopus: 57739377400) – Deputy Director for Geophysical and Hydrodynamic Research (tel.: +007 (952) 333 94 88; e-mail: Shiriaev.EO@pnsh.ru).
© **Svetlana F. Anisimova** – Leading Engineer of the Interpretation Center Development Control Group (tel.: +007 (963) 882 20 69; e-mail: Anisimova.SF@pnsh.ru).
© **Sergey V. Galkin** (Author ID in Scopus: 36711675500, ORCID: 0000-0001-7275-5419) – Dean of the Mining and Oil Faculty, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences (tel.: +007 (342) 219 81 18; e-mail: doc_galkin@mail.ru). The contact person for correspondence.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Ширяев, Е.О. Применение оптоволоконного мониторинга термометрии при контроле формирования цементного камня в затрубном пространстве скважин / Е.О. Ширяев, С.Ф. Анисимова, С.В. Галкин // Недропользование. – 2024. – Т.24, №2. – С.72–77. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.2.4

Please cite this article in English as:
Shiryaev E.O., Anisimova S.F., Galkin S.V. Application of fiber optic thermometry monitoring in the control the formation of cement stone in the well annulus. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2024, vol.24, no.2, pp.72-77. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.2.4

Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений мониторинга работы нефтегазодобывающих скважин является применение оптоволоконных технологий. Основным преимуществом применения оптоволоконного мониторинга является возможность осуществлять непрерывный контроль по всей длине скважины, регистрируя события в реальном времени [1, 2]. Оптоволоконные технологии мониторинга скважин в последние годы все активнее применяются как за рубежом [3–5], так и в отечественной нефтегазовой промышленности [6–8]. При этом перспективным методом контроля за разработкой является мониторинг распределения температурного поля по стволу скважины [9, 10]. В модификации измерения температуры на скважинах применяется оптоволоконная термометрия скважин (distributed temperature sensing – DTS) [11, 12]. В Пермском крае в период 2012–2024 гг. имеются результаты успешного применения технологии DTS при контроле за разработкой в части определения зон негерметичности колонны и заколонных перетоков [13–15]; выделения аномалий, связанных с разделением фазового состава жидкости [16–18]; мониторинга работы технологического оборудования [19].

Одной из актуальных задач эксплуатации скважин является мониторинг технического состояния скважин, в том числе контроль процесса ожидания затвердевания цемента (ОЗЦ) [20–22]. На сегодняшний день исследования по определению качества цементирования обсадных колонн проводятся прямым замером параметров процесса закачки цемента [23], а также после завершения ОЗЦ стандартными методами акустической цементометрии (АКЦ) и гамма-гамма-цементометрии (ГГК-ц) [24–26]. В случае выявления интервалов отсутствия цемента, а также контакта цемента с породой или колонной проводятся дополнительные операции по дозаливке цемента через специально создаваемые технологические отверстия [25]. При этом необходимо отметить, что в последние годы с развитием систем обработки геофизического материала [27–29], а также внедрением сканирующих модификаций АКЦ [30, 31] значительно вырос качественный уровень проводимых замеров. Однако в целом выполнение описанных выше операций приводит к увеличению времени на строительство скважины и соответственно существенному ее удорожанию. Кроме этого, стандартные методы не позволяют детально описать типы дефектов цементного кольца. На взгляд авторов, данную проблему более эффективно и с меньшими затратами может решить применение оптоволоконной термометрии скважин. При этом замеры на основе технологии оптоволоконной термометрии (DTS) могут быть реализованы как в кондукторе, так и в технической колонне строящейся скважины. В целом это создает возможность перейти от замеров постфактум к мониторингу в режиме реального времени [32–34] с выявлением осложненных участков и своевременному принятию необходимых проектных решений. В том числе применение мониторинга на основе DTS дает возможность завершать процесс ОЗЦ не по усредненному временному интервалу, заложенному в план строительства скважины, а именно при фактическом завершении процесса схватывания цемента, что снижает риски строительства и последующей эксплуатации скважины.

Технические характеристики измерительного комплекса термометрии Silixa Ultima-S

Параметр	Silixa Ultima-S
Шаг дискретизации, см	12,5
Пространственное разрешение, см	25
Разрешение по температуре, °С	0,01
Время измерений, с	от 1
Чувствительность, °С	0,05
Длина кабеля, км	до 5
Разрешение по длине, см	12
Время накопления, мин	12

Постановка задачи. Материалы и методы

Современные регистрирующие комплексы DTS позволяют проводить одновременный замер на пяти оптиковолоконных линиях. При реализации метода использовался регистратор Silixa Ultima-S, представляющий из себя малогабаритный измерительный комплекс, позволяющий проводить замеры должного уровня качества для решения задач термометрии [9], технические характеристики приведены в таблице, что обеспечивает возможность измерения температуры по длине оптоволоконного кабеля с шагом 25 см и точностью до 0,05 градуса.

В качестве датчика применяется специализированный кабель в армированной оболочке, исключающей повреждение волокна в процессе производства спускоподъемных операций, а также позволяющий эксплуатировать кабель на стандартном геофизическом каротажном самоходном подъемнике. При этом вместо стандартной конструкции кабеля – токопроводящих жил и полимерной изоляции – применяются четыре волоконных нити, являющиеся непосредственно датчиками температуры, помещенные в геленаполненную стальную трубку. В конструкции применено два повива брони кабеля, что обеспечило предельную нагрузку на разрыв в 55 кН.

Для контроля регистрируемых абсолютных значений, применялся комплексный геофизический прибор «Сова-5», позволяющий проводить одновременное измерение температуры, давления, а также мощности экспозиционной дозы гамма-излучения горных пород (ГК) для привязки к разрезу скважины. Прибор имеет действующий сертификат калибровки, в процессе замеров он был размещен в нижней точке геофизического кабеля на глубине 971 м.

Для проведения опытно-промышленных работ по контролю затвердевания цементного камня была выбрана скважина, эксплуатирующая объект на одном из месторождений в границах Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). Совместная разработка запасов нефти и калийных солей существенно повышает требования к осуществлению мониторинга качества крепления скважин [35–37], что делает поставленную задачу для данной территории еще более актуальной.

Результаты

Исследования по контролю затвердевания цементного камня с помощью оптоволоконной термометрии в рамках опытных работ проведены на одной из скважин ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

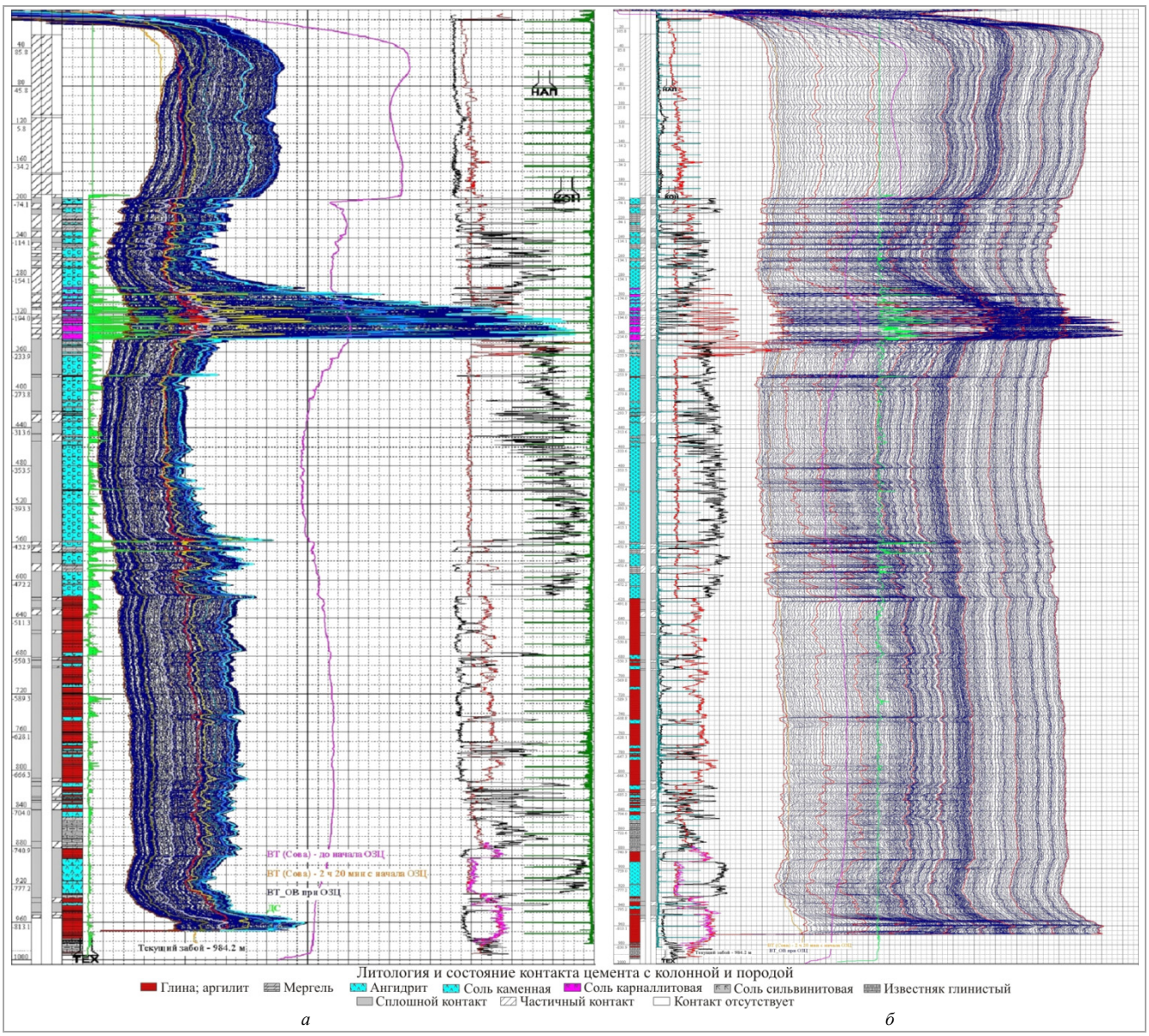


Рис. 1. Контроль ОЗЦ технической колонны с помощью оптоволоконной термометрии (*а*); контроль ОЗЦ технической колонны с помощью оптоволоконной термометрии (развертка) (*б*)

При выполнении работ ставились следующие задачи:

– определить возможность контроля процесса схватывания цемента с помощью оптоволоконного кабеля;

– определить время, необходимое для полного застывания цементного камня для последующего контроля качества крепи.

В процессе исследований оптоволоконный кабель был спущен в скважину после окончания цементирования технической колонны (d = 245 мм), первая запись проведена через 4 ч после завершения прокачки цемента. Записи длились 44 ч с шагом 12 мин (время накопления).

Предварительно, с целью повышения достоверности данных и исключения неоднозначностей при интерпретации, в процессе строительства скважины (в открытом стволе) проведен комплекс каротажа с целью литологического расчленения разреза, данные нанесены на планшеты (рис. 1, 2). После завершения мониторинга была проведена запись методами акустического (АКЦ) и гамма-гамма-каротажа (ГГК-ц), результат нанесен на планшеты (см. рис. 1, 2). Одним из возможных путей совершенствования технологии может служить применение испытаний пластов на приток [38-40], что позволит получить наиболее достоверные сведения о насыщении ород в целевом интервале. В данном случае эти методы не применялись в связи с технологическими особенностями режима эксплуатации скважины.

Во время исследований проведены следующие записи: фоновый замер комплексным геофизическим прибором «Сова-5» и замеры термометрии во время ОЗЦ технической колонны. В результате интерпретации комплекса исследований оптоволоконной термометрии получены следующие практические выводы:

– положение текущего забоя после цементирования определено на глубине 984,2 м (см. рис. 1, *а*);

– установлен подъем цемента до устья скважины (см. рис. 1, *б*);

– после цементажа отмечаются термодинамические процессы по всему стволу скважины. Наиболее сильный разогрев отмечен в интервале карналитовой толщи иренского горизонта, максимальная температура разогрева составила 50,6 °С (см. рис. 1).

При этом анализ динамики изменения температуры показывает, что на глубине 971 м температура увеличилась с 24,7 до 29,5 °С, затем постепенно снижалась и в конце замера составляла 22,0 °С. Давление не изменялось и составило около 125,6 атм (рис. 2).

В первые сутки идет интенсивная реакция с выделением тепла, при этом функция имеет экспоненциальный характер, в том числе за счет теплопередачи в окружающую среду. Через сутки потенциал экзотермической реакции падает, реакция замедляется – температура снижается по линейному закону за счет теплопередачи в окружающую среду. Установлено, что в интервале двухколонной конструкции процесс идет более медленно, чем за одной колонной. Вероятно, это связано с процессами теплопередачи и (или) процесса гидратации цемента. Ожидается, что когда реакция прекратится, процесс выравнивания температуры с окружающей средой примет форму гиперболы. В таком случае можно говорить об окончании процесса застывания цементного камня. Ввиду ограниченности времени записи вывод температуры на асимптоту при проведении работ не был зафиксирован.

Так как оптоволоконный кабель является непосредственно датчиком температуры, на каждой точке ствола скважины с шагом дискретизации (см. таблицу) имеется возможность построения графика распределения температуры во времени. В данном случае, в отличие от стандартного геофизического прибора с датчиком температуры (рис. 2), нет необходимости движения кабеля в скважине. Это позволяет изучать динамику быстро меняющихся скважинных событий без риска потери данных.

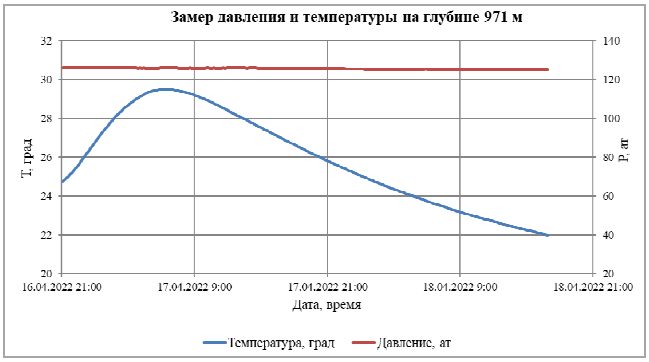


Рис. 2. Распределение температуры и давления во времени на забое по прибору «Сова-5»

Заключение

В результате проведенных исследований по технологии DTS отработана технология и проведен мониторинг процесса формирования цементного камня. Полученные результаты позволяют провести регистрацию температуры в режиме онлайн, в отличие от стандартных методик производства замеров АКЦ и ГГК-ц. В результате установлено, что плановое заявленное время застывания цемента недостаточно для полного завершения реакции, что говорит о неполном формировании цементного камня на момент проведения замеров АКЦ и ГГК-ц.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что имеется высокий потенциал для дальнейшего развития предложенной технологии, в том числе в части ее методологического развития, а также путем автоматизации технологических процессов. Важным преимуществом метода DTS является возможность в перспективе разместить оптоволоконный кабель за колонной непосредственно в цементе, что дает возможность организовать систему длительного мониторинга как в процессе, так и после завершения строительства скважины.

Перспективным направлением для решения поставленных задач представляется комплексирование DTS с технологией распределенных акустических датчиков (distributed acoustic sensing – DAS) [41–43], что позволит более достоверно говорить о природе выделенных температурных аномалий. Мониторинг работы скважины методами DTS и DAS целесообразно проводить одновременно с единой системой регистрации, позволяющей синхронизировать их результаты.

Библиографический список

1. Кислов, К.В. Распределенное акустическое зондирование: новый инструмент или новая парадигма / К.В. Кислов, В.В. Гравиров // Сейсмические приборы. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 5–38. DOI: 10.21455/si2022.2-1
2. Fibre Optic Monitoring of Groundwater Flow in a Drinking Water Extraction Well Field: Conference Proceedings, First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing. Amsterdam, 9-11 March 2020 / P. Kruiver, E. Obando-Hernández, M. Pefkos, M. Karaoulis, W. Bakx, P. Doornenbal, F. Ciocca, A. Chalari, M. Mondanos. – Amsterdam, 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202030010
3. Measurement, monitoring, verification and modelling at the Aquistore CO_2 storage site / Zeinab Movahedzadeh, Alireza Rangriz Shokri, Rick Chalaturnyk, Erik Nickel, Norm Sacuta // FIRST BRAKE. – 2021. – Vol. 39. – P. 69–75. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2021013
4. Distributed electric field sensing using fibre optics in borehole environments / David L. Alumbaugh, Evan Schankee Um, G. Michael Hoversten, Kerry Key // Geophysical Prospecting. – 2022. – Vol. 70. – P. 210–221. DOI: 10.1111/1365-2478.13150
5. Peyman, Moradi. Fibre-optic sensing and microseismic monitoring evaluate and enhance hydraulic fracturing via real-time and post-treatment analysis / Peyman Moradi, Suresh Dande, Doug Angus // FIRST BRAKE. – 2020. – Vol. 38. – P. 65–72. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2020067
6. Kuvshinov, B.N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves / B.N. Kuvshinov // Geophysical Prospecting. – 2016. – Vol. 64, no. 3. – P. 671–688. DOI: 10.1111/1365-2478.12303
7. Оценка возможностей применения технологии виброакустического воздействия (DAS) при мониторинге работы нефтяных и газовых скважин / И.Ю. Колычев, А.М. Денисов, С.В. Белов [и др.] // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2022. – Т. 1. – С. 250–255.
8. Чугаев, А.В. Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна / А.В. Чугаев, М.В. Тарантин // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8, № 1. – С. 13–21. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-06-10
9. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э.Б. Чекалюк. – М.: Недра, 1965.
10. Мониторинг температурного поля с помощью оптоволоконных технологий при площадных исследованиях / Е.С. Найданова, В.Ф. Рыбка, А.И. Губина, П.Ю. Чудинов // Каротажник. – 2020. – № 6 (306). – С. 82–91.
11. Distributed Temperature Sensing Monitoring of Well Completion Processes in a CO_2 Geological Storage Demonstration Site / D. Lee, K.G. Park, C.-N. Lee, S.-J. Choi // Sensors, Basel. – 2018. – Vol. 18. – P. 4239. DOI: 10.3390/s18124239
12. Lauber, T. Enhanced Temperature Measurement Performance: Fusing DTS and das Results / T. Lauber, G. Lees // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, no 6. – P. 7948–7953. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3046339
13. Найданова, Е.С. Опыт использования оптоволоконных технологий при геофизических исследованиях скважин / Е.С. Найданова, В.Ф. Рыбка, П.Ю. Чудинов // Каротажник. – 2019. – № 5 (299). – С. 62–72.
12. Ширяев, Е.О. Опыт применения оптоволоконных систем термометрии для исследования скважин / Е.О. Ширяев // Каротажник. – 2023. – № 6 (326). – С. 76–86.
15. Чудинов, П.Ю. Определение дебита скважин и учет добычи с использованием оптоволоконных технологий / П.Ю. Чудинов // Каротажник. – 2023. – № 6 (326). – С. 87–96.
16. Рыбка, В.Ф. Результат применения оптоволоконных технологий распределенной термометрии при освоении скважины с помощью ЭЦН / В.Ф. Рыбка // Экспозиция нефть газ. – 2013. – № 7 (32). – С. 13–16.
17. Рыбка, В.Ф. Волоконно-оптическая термометрия скважин. Мониторинг формирования газогидратной пробки /В.Ф. Рыбка, С.И. Васютинская // Научный журнал Российского газового общества. – 2018. – № 1. – С. 43–46.

18. Оптоволоконные технологии контроля технического состояния добывающих скважин / Р.К. Яруллин, Р.А. Валиуллин [и др.] // Каротажник. – 2014. – № 9 (243). – С. 47–55.
19. Найданова, Е.С. Дополнительные возможности оптоволоконных технологий при поиске негерметичности и горячей промывке скважины / Е.С. Найданова, В.Ф. Рыбка, П.Ю. Чудинов // Каротажник. – 2018. – № 10 (292). – С. 39–47.
20. Самсоненко, А.В. Механизмы возникновения и технологии устранения осложнений процесса цементирования обсадных колонн / А.В. Самсоненко, Н.В. Самсоненко, С.Л. Симонянц // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – № 11. – С. 35–42.
21. Храбров, В.А. Обзор и анализ математических моделей снижения порового давления столба цементного раствора в период ОЗЦ / В.А. Храбров, К.Ф. Шуть // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2023. – № 1 (361). – С. 35–39. DOI: 10.33285/0130-3872-2023-1(361)-35-39
22. Курбанов, Я.М. Анализ технических решений по предотвращению поступления пластовых флюидов в заколонное пространство скважины в период ожидания затвердевания цемента / Я.М. Курбанов, Н.А. Черемисина // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. – № 5 (137). – С. 64–71. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-5-64-71
23. Шумилов, А.В. Опыт использования станций контроля цементирования на площадях Пермского Прикамья / А.В. Шумилов // Тезисы докладов научного симпозиума «Новые технологии в геофизике». – Уфа: Изд. ОАО НПФ «Геофизика». – 2001. – С. 86–87.
24. Косков, В.Н. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС: учеб. пособие / В.Н. Косков, Б.В. Косков. – Пермь: ПГТУ, 2007. – 317 с.
25. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах: РД 153-39.0-072-01. Введ. с 01.07.2001. – М., 2001. – 135 с.
26. Белов, С.В. Повышение достоверности определения качества цементирования обсаженных скважин по данным акустической цементометрии / С.В. Белов, А.В. Шумилов // Тезисы докладов научного симпозиума «Высокие технологии в промысловой геофизике». – Уфа: Изд. ОАО НПФ «Геофизика», 2004. – С. 31–33.
27. Учет влияния скважинного прибора при акустической цементометрии / С.В. Белов, А.В. Шумилов, И.В. Ташкинов, Е.В. Заичкин // Доклады III Российско-Китайского симпозиума «Новые технологии в геологии и геофизике». – Уфа: Изд. ОАО НПФ «Геофизика», 2004. – С. 90–96.
28. Совершенствование технологии обработки данных ГИС с помощью нового программного комплекса / С.В. Белов, Е.В. Заичкин, О.В. Наугольных, И.В. Ташкинов, А.А. Шилов, А.В. Шумилов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Геофизические исследования скважин», посвященной 100-летию промысловой геофизики. – М., Изд. РГУНГ им. И.М. Губкина, 2006. – С. 65–66.
29. Совершенствование технологии обработки данных ГИС в программном комплексе «Соната» / И.В. Ташкинов, А.В. Шумилов, С.В. Белов, Е.В. Заичкин, О.В. Наугольных, А.А. Шилов // Доклады IV Китайско-Российского симпозиума «Новейшие достижения в области геофизических исследований скважин». – Уфа: Изд. ОАО НПФ «Геофизика», 2006. – С. 206–215.
30. Производственный опыт применения комплекса методов АКЦ и АКЦ-С в ООО «ПИТЦ «Геофизика» / П.Н. Гуляев, С.В. Белов, О.В. Наугольных, А.В. Шумилов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Новые достижения в технике и технологии ГИС». – Уфа: Изд. ОАО НПФ «Геофизика», 2009. – С. 74–76.
31. Крючатов, Д.Н. Сканирующая цементометрия – эффективный способ повышения информативности ГИС в Западно-Сибирском регионе / Д.Н. Крючатов, А.С. Чухлов, А.В. Шумилов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». – Уфа: Изд. НПФ «Геофизика», 2010. – С. 162–164.
32. Thermal submesoscale motions in the nocturnal stable boundary layer. Part 1: detection and mean statistics / L. Pfister, K. Lapo, L. Mahrt, Ch.K. Thomas // Boundary-Layer Meteorology. – 2021. – Vol. 180, № 2. – P. 187–202. DOI: 10.1007/s10546-021-00619-z
33. Халилов, Д.Г. Волоконно-оптическая система активной термометрии / Д.Г. Халилов // Каротажник. – 2021. – № 3 (309). – С. 139–151.
34. Применение оптоволоконных систем при реализации комплексных технологий заканчивания и долговременного мониторинга работы скважин / А.П. Лаптев, А.Д. Савич, В.И. Костицын, А.В. Шумилов, О.Л. Сальникова, Д.Г. Халилов // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 8. – С. 94–99. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-8-94-99
35. Филатов, В.В. О тектоническом плане Верхнекамского месторождения калийных солей по результатам физического моделирования и по геолого-геофизическим данным / В.В. Филатов, Л.А. Болотнова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 5. – С. 38–46. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-38-46
36. Моделирование напряженно-деформированного состояния необсаженной скважины / С.Г. Ашихмин, А.Э. Кухтинский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – Т. 13, № 11. – С. 99–104.
37. Лебедева, О.О. Анализ и подготовка исходных данных для построения геолого-геомеханической модели участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / О.О. Лебедева // Недропользование. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 139–143. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.5
38. Шакиров, А.А. Современное состояние аппаратуры и методики испытания пластов и отбора приборами на кабеле / А.А. Шакиров, В.Н. Даниленко // Нефть. Газ. Новации. – 2018. – № 2. – С. 46–49.
39. Тюрина, Г.В. Применение модульного динамического испытателя пластов на каротажном кабеле для уточнения фильтрационных характеристик продуктивных пластов Маговского нефтегазоконденсатного месторождения / Г.В. Тюрина // Недропользование. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 25–31. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.4
40. Опыт использования модульного пластоиспытателя для решения различных геологических задач / И.Т. Дилявиров, М.Р. Абунагимов, Р.У. Исянгулов, А.М. Мустафин, В.А. Змановский, Н.Н. Лукьянов // Каротажник. – 2020. – № 2 (302). – С. 63–77.
41. Gabai, H. On the sensitivity of distributed acoustic sensing / H. Gabai, A. Eyal // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41 (24). – P. 5648–5651. DOI: 10.1364/OL.41.005648
42. Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring / T.M. Daley [et al.] // The Leading Edge. – 2013. – Vol. 32(6). – P. 593–724. DOI: 10.1190/TLE32060699.1
43. Dean, T. The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fibre optic distributed vibration sensing: Gauge length effect on incident P-waves / T. Dean, T. Cuny, A.H. Hartog // Geophysical Prospecting. – 2017. – Vol. 65(1). – P. 184–193. DOI: 10.1111/1365-2478.12419

References

1. Kislov K.V., Gravirov V.V. Raspredelennoe akusticheskoe zondirovanie: novyi instrument ili novaia paradigma [Distributed Acoustic Sensing: A New Tool or a New Paradigm]. *Seismicheskie pribory*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 5-38. DOI: 10.21455/si2022.2-1
2. Kruiver P., Obando-Hernández E., Pefkos M., Karaoulis M., Bakx W., Doornenbal P., Ciocca F., Chalari A., Mondanos M. Fibre Optic Monitoring of Groundwater Flow in a Drinking Water Extraction Well Field: Conference Proceedings, First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing. Amsterdam, 9-11 March 2020. Amsterdam, 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202030010
3. Zeinab Movahedzadeh, Alireza Rangriz Shokri, Rick Chalaturnyk, Erik Nickel, Norm Sacuta. Measurement, monitoring, verification and modelling at the Aquistore CO_2 storage site. *FIRST BRAKE*, 2021, vol. 39, pp. 69-75. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2021013
4. Alumbaugh David L., Evan Schankee Um, Hoversten G. Michael, Key Kerry. Distributed electric field sensing using fibre optics in borehole environments. *Geophysical Prospecting*, 2022, vol. 70, pp. 210-221. DOI: 10.1111/1365-2478.13150
5. Peyman Moradi, Suresh Dande, Doug Angus. Fibre-optic sensing and microseismic monitoring evaluate and enhance hydraulic fracturing via real-time and post-treatment analysis. *FIRST BRAKE*, 2020, vol. 38, pp. 65-72. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2020067
6. Kuvshinov B.N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves. *Geophysical Prospecting*, 2016, vol. 64, no. 3, pp. 671-688. DOI: 10.1111/1365-2478.12303
7. Kolychev I.Iu., Denisov A.M., Belov S.V. et al. Otsenka vozmozhnostei primeneniia tekhnologii vibroakusticheskogo vozdeistviia (DAS) pri monitoringe raboty neftianykh i gazovykh skvazhin [Assessment of the possibilities of using distributed acoustic sensing technology in monitoring the operation of oil and gas wells]. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*, 2022, vol. 1, pp. 250-255.
8. Chugaev A.V., Tarantin M.V. Amplitudno-chastotnyi otklik raspredelennogo akusticheskogo sensora DAS so spiral'noi namotkoi volokna [Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor]. *Gornye nauki i tekhnologii*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 13-21. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-06-10
9. Chekaliuk E.B. Termodinamika neftianogo plasta [Thermodynamics of an oil reservoir]. Moscow: Nedra, 1965.
10. Naidanova E.S., Rybka V.F., Gubina A.I., Chudinov P.Iu. Monitoring temperaturnogo polia s pomoshch'iu optovolokonnykh tekhnologii pri ploshchadnykh issledovaniiakh [Temperature field monitoring with the help of fiber optic technologies in areal surveys]. *Karotazhnik*, 2020, no. 6 (306), pp. 82-91.
11. Lee D., Park K.G., Lee C.-N., Choi S.-J. Distributed Temperature Sensing Monitoring of Well Completion Processes in a CO_2 Geological Storage Demonstration Site. *Sensors, Basel*, 2018, vol. 18, 4239 p. DOI: 10.3390/s18124239
12. Lauber T., Lees G. Enhanced Temperature Measurement Performance: Fusing DTS and das Results. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no 6, pp. 7948-7953. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3046339
13. Naidanova E.S., Rybka V.F., Chudinov P.Iu. Opyt ispol'zovaniia optovolokonnykh tekhnologii pri geofizicheskikh issledovaniiakh skvazhin [An experience of using fiber optic technologies in well logging]. *Karotazhnik*, 2019, no. 5 (299), pp. 62-72.
14. Shiriaev E.O. Opyt primeneniia optovolokonnykh sistem termometrii dlia issledovaniia skvazhin [An experience of applying fiber-optic temperature-measurement systems for well logging]. *Karotazhnik*, 2023, no. 6 (326), pp. 76-86.
15. Chudinov P.Iu. Opredelenie debita skvazhin i uchet dobychi s ispol'zovaniem optovolokonnykh tekhnologii [Well output evaluation and production monitoring using fiberoptic technologies]. *Karotazhnik*, 2023, no. 6 (326), pp. 87-96.
16. Rybka V.F. Rezul'tat primeneniia optovolokonnykh tekhnologii raspredelennoi termometrii pri osvoenii skvazhiny s pomoshch'iu ETsN [The result of the application of distributed fiber-optic technology in thermometry of development wells with ESP]. *Ekspozitsiia neft' gaz*, 2013, no. 7 (32), pp. 13-16.
17. Rybka V.F., Vasiutinskaia S.I. Volokonno-opticheskaia termometriia skvazhin. Monitoring formirovaniia gazogidratnoi probki [Fiber-optic thermometry of wells. Monitoring the formation of gas hydrate plug]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo gazovogo obshchestva*, 2018, no. 1, pp. 43-46.
18. Iarullin R.K., Valiullin R.A. et al. Optovolokonnye tekhnologii kontrolia tekhnicheskogo sostoianiia dobyvaiushchikh skvazhin [Fiber optic technologies for technical state control in producing wells]. *Karotazhnik*, 2014, no. 9 (243), pp. 47-55.

19. Naidanova E.S., Rybka V.F., Chudinov P.Iu. Dopolnitel'nye vozmozhnosti optovolokonnykh tekhnologii pri poiske negermetichnosti i goriachei promyvke skvazhiny [Extra capabilities of the fiber-optic technologies in leak-checks and hot-washing of the well]. *Karotazhnik*, 2018, no. 10 (292), pp. 39-47.
20. Samsonenko A.V., Samsonenko N.V., Simoniants S.L. Mekhanizmy vozniknoveniia i tekhnologii ustraneniia oslozhnenii protsessa tsementirovaniia obsadnykh kolonn [Mechanisms of occurrence and technologies for eliminating complications of the casing cementing process]. *Stroitel'stvo neftianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2016, no. 11, pp. 35-42.
21. Khrabrov V.A., Shut' K.F. Obzor i analiz matematicheskikh modelei snizheniia porovogo davleniia stolba tsementnogo rastvora v period OZTs [Review and analysis of mathematical models for decreasing the pore pressure of a cement slurry column in the waiting on cement (WOC) period]. *Stroitel'stvo neftianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2023, no. 1 (361), pp. 35-39. DOI: 10.33285/0130-3872-2023-1(361)-35-39
22. Kurbanov, Ia.M., Cheremisina N.A. Analiz tekhnicheskikh reshenii po predotvrashcheniiu postupleniia plastovykh fliuidov v zakolonnoe prostranstvo skvazhiny v period ozhidaniia zatverdevaniia tsementa [Analysis of technical solutions for preventing admission of formation fluids in the annular space of the well during the waiting on cement time]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2019, no. 5 (137), pp. 64-71. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-5-64-71
23. Shumilov A.V. Opyt ispol'zovaniia stantsii kontrolia tsementirovaniia na ploshchadiakh Permskogo Prikam'ia [Experience of using cementing control stations in the areas of the Perm Kama region]. *Tezisy dokladov nauchnogo simpoziuma "Novye tekhnologii v geofizike"*. Ufa: OAO NPF "Geofizika", 2001, pp. 86-87.
24. Koskov, V.N., Koskov B.V. Geofizicheskie issledovaniia skvazhin i interpretatsiia dannykh GIS [Geophysical surveys of wells and interpretation of well logging data]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007, 317 p.
25. Tekhnicheskaia instruktsiia po provedeniiu geofizicheskikh issledovanii i rabot priborami na kabele v neftianykh i gazovykh skvazhinakh: RD 153-39.0-072-01. Vvedenie s 01.07.2001 [Technical instructions for conducting geophysical research and work with wireline instruments in oil and gas wells: RD 153-39.0-072-01. Introduction from 07/01/2001]. Moscow, 2001, 135 p.
26. Belov S.V., Shumilov A.V. Povyshenie dostovernosti opredeleniia kachestva tsementirovaniia obsazhennykh skvazhin po dannym akusticheskoi tsementometrii [Increasing the reliability of determining the quality of cementation of cased wells using acoustic cementometry data]. *Tezisy dokladov nauchnogo simpoziuma "Vysokie tekhnologii v promyslovoi geofizike"*. Ufa: OAO NPF "Geofizika", 2004, pp. 31-33.
27. Belov S.V., Shumilov A.V., Tashkinov I.V., Zaichkin E.V. Uchet vliianiia skvazhinnogo pribora pri akusticheskoi tsementometrii [Taking into account the influence of downhole tools during acoustic cementometry]. *Doklady III Rossiisko-Kitaiskogo simpoziuma "Novye tekhnologii v geologii i geofizike"*. Ufa: OAO NPF "Geofizika", 2004, pp. 90-96.
28. Belov S.V., Zaichkin E.V., Naugol'nykh O.V., Tashkinov I.V., Shilov A.A., Shumilov A.V. Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki dannykh GIS s pomoshch'iu novogo programmnogo kompleksa [Improving well logging data processing technology using a new software package]. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii "Geofizicheskie issledovaniia skvazhin", posviashchennoi 100-letiiu promyslovoi geofiziki*. Moscow: Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nefti i gaza imeni I.M Gubkina, 2006, pp. 65-66.
29. Tashkinov I.V., Shumilov A.V., Belov S.V., Zaichkin E.V., Naugol'nykh O.V., Shilov A.A. Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki dannykh GIS v programmnom komplekse "Sonata" [Improving well logging data processing technology in the "Sonata" software package]. *Doklady IV Kitaisko-Rossiiskogo simpoziuma "Noveishie dostizheniia v oblasti geofizicheskikh issledovanii skvazhin"*. Ufa: OAO NPF "Geofizika", 2006, pp. 206-215.
30. Guliaev P.N., Belov S.V., Naugol'nykh O.V., Shumilov A.V. Proizvodstvennyi opyt primeneniia kompleksa metodov AKTs i AKTs-S v OOO "PITTs "Geofizika" [Production experience in using a complex of ACC and ACC-S methods at LLC "PITC "Geophysics"]. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii "Novye dostizheniia v tekhnike i tekhnologii GIS"*. Ufa: OAO NPF "Geofizika", 2009, pp. 74-76.
31. Kriuchatov D.N., Chukhlov A.S., Shumilov A.V. Skaniruiushchaia tsementometriia - effektivnyi sposob povysheniia informativnosti GIS v Zapadno-Sibirskom regione [Scanning cementometry is an effective way to increase the information content of well logging in the West Siberian region]. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii "Novaia tekhnika i tekhnologii dlia geofizicheskikh issledovanii skvazhin"*. Ufa: NPF "Geofizika", 2010, pp. 162-164.
32. Pfister L., Lapo K., Mahrt L., Thomas Ch.K. Thermal submesoscale motions in the nocturnal stable boundary layer. Part 1: detection and mean statistics. *Boundary-Layer Meteorology*, 2021, vol. 180, no. 2, pp. 187-202. DOI: 10.1007/s10546-021-00619-z
33. Khalilov D.G. Volokonno-opticheskaia sistema aktivnoi termometrii [An optic fiber system for the active temperature measurements]. *Karotazhnik*, 2021, no. 3 (309), pp. 139-151.
34. Laptev A.P., Savich A.D., Kostitsyn V.I., Shumilov A.V., Sal'nikova O.L., Khalilov D.G. Primenenie optovolokonnykh sistem pri realizatsii kompleksnykh tekhnologii zakanchivaniia i dolgovremennogo monitoringa raboty skvazhin [The use of fiber-optic systems in the implementation of complex well completion technologies and long-term operation monitoring]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2022, no. 8, pp. 94-99. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-8-94-99
35. Filatov V.V., Bolotnova L.A. O tektonicheskom plane Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei po rezul'tatam fizicheskogo modelirovaniia i po geologo-geofizicheskim dannym [Upper Kama potassium salt deposit tectonic scheme based on physical modeling results and geological and geophysical data]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2020, no. 5, pp. 38-46. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-38-46
36. Ashikhmin S.G., Kukhtinskii A.E. Modelirovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia neobsazhennoi skvazhiny [Simulation of stress-deformed state of open well]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiia. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2014, vol. 13, no. 11, pp. 99-104.
37. Lebedeva O.O. Analiz i podgotovka iskhodnykh dannykh dlia postroeniia geologo-geomekhanicheskoi modeli uchastka Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliino-magnievykh solei [Analysis and preparation of initial data for building a geological and geomechanical model of the area at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit]. *Nedropol'zovanie*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 139-143. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.5
38. Shakirov A.A., Danilenko V.N. Sovremennoe sostoianie apparatury i metodiki ispytaniia plastov i otbora priborami na kabele [The current state of equipment and methods for testing formations and sampling with wireline instruments]. *Neft'. Gaz. Novatsii*, 2018, no. 2, pp. 46-49.
39. Tiurina G.V. Primenenie modul'nogo dinamicheskogo ispytatelia plastov na karotazhnom kabele dlia utochneniia fil'tratsionnykh kharakteristik produktivnykh plastov Magovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniia [Application of a Modular Dynamic Formation Tester on a Wire Line to Refine the Filtration Characteristics of the Production Formations of the Magovsky Oil and Gas Condensate Field]. *Nedropol'zovanie*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 25-31. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.4
40. Diliavirov I.T., Abunagimov M.R., Isiangulov R.U., Mustafin A.M., Zmanovskii V.A., Luk'ianov N.N. Opyt ispol'zovaniia modul'nogo plastoispytatelia dlia resheniia razlichnykh geologicheskikh zadach [Experience of using the modular formation dynamics tester for solving different geological problems]. *Karotazhnik*, 2020, no. 2 (302), pp. 63-77.
41. Gabai H., Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing. *Optics Letters*, 2016, vol. 41 (24), pp. 5648-5651. DOI: 10.1364/OL.41.005648
42. Daley T.M. et al. Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. *The Leading Edge*, 2013, vol. 32 (6), pp. 593-724. DOI: 10.1190/TLE32060699.1
43. Dean T., Cuny T., Hartog A.H. The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fibre optic distributed vibration sensing: Gauge length effect on incident P-waves. *Geophysical Prospecting*, 2017, vol. 65 (1), pp. 184-193. DOI: 10.1111/1365-2478.12419

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.