УДК 550.348.43
https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-365-375

CC BY 4.0

Оригинальная статья

Дистанционный сейсмический мониторинг первой ступени Вилюйского каскада ГЭС по записям сейсмической станции «Чернышевский»

А. А. Макаров✉[1,2], В. С. Селезнев[3]

[1]*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*
[2]*Якутский филиал Единой геофизической службы РАН, г. Якутск, Российская Федерация*
[3]*Сейсмологический филиал Единой геофизической службы РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация*

✉*Makarov.2A@yandex.ru*

Аннотация
В связи с развитием методов цифровой обработки сейсмических сигналов расширились возможности анализа малоамплитудных сигналов как естественного, так и техногенного происхождения. В данной статье рассматривается возможность дистанционного определения сейсмических сигналов работающего оборудования первой и второй очередей каскада Вилюйской гидроэлектростанции (КВГЭС-1 и КВГЭС-2) в инженерно-геологических условиях криолитозоны при помощи методики и программного обеспечения, разработанных в Федеральном исследовательском центре «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН). С использованием в качестве фактического материала сейсмических наблюдений сети Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН были обработаны записи сейсмической станции «Чернышевский», удаленной от КВГЭС-1 и КВГЭС-2 на 1,256 и 1,456 км соответственно. Построены графики усредненных спектров сейсмических сигналов за различные промежутки времени, на которых наблюдалось множество монохромных сигналов. Анализ построенных графиков и технической документации оборудования каскада ГЭС позволил установить корреляцию между обрабатываемым сигналом и характеристиками работающего оборудования, являющегося возбуждающим источником. На примере анализа нештатной ситуации, возникшей 4 марта 2023 г. в результате некорректной работы систем регулирования генерирующего оборудования каскада ГЭС, был подтвержден факт принадлежности выделенных сигналов к генерирующему оборудованию. Были установлены величины отклонений выделенных частот работающего оборудования от номинальных, а также время возникновения технических неполадок. Опробована и подтверждена применимость использованной методики для проведения сейсмогеотехнического мониторинга инженерных объектов, расположенных в криолитозоне.

Ключевые слова: Вилюйская ГЭС, сейсмостанция, микросейсмы, сейсмический мониторинг, дистанционный контроль

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН (№ FUFG-2024-0005), а также при поддержке Минобрнауки РФ (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные рекомендации.

Для цитирования: Макаров А.А., Селезнев В.С. Дистанционный сейсмический мониторинг первой ступени Вилюйского каскада ГЭС по записям сейсмической станции «Чернышевский». *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):365–375. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-365-375

© Макаров А. А., Селезнев В. С., 2025

Original article

Remote seismic monitoring of the of the first stage of the Vilyui HPP cascade using records from the “Chernyshevsky” seismic station

Alexander A. Makarov✉[1,2], Victor S. Seleznev[3]

[1]*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*
[2]*Yakut Regional Seismological Centre of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*
[3]*Seismological Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

✉*Makarov.2A@yandex.ru*

Abstract
Advancements in digital seismic signal processing have significantly enhanced the ability to analyze low-amplitude signals from both natural and anthropogenic sources. This article investigates the potential for remotely detecting seismic signals generated by operating equipment at the first and second stages of the Vilyui Hydroelectric Power Plant cascades (HPP-1 and HPP-2) within the engineering and geological conditions of the permafrost region. The study employs methods and software developed by the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”. Seismic data from the Yakut Regional Seismological Centre network, including records from the “Chernyshevsky” seismic station and the Vilyui HPP-1 and HPP-2 - located 1.256 kilometers and 1.456 kilometers away, respectively—were processed. Averaged spectral graphs of seismic signals over various time intervals were constructed, revealing numerous monochromatic signals. Analysis of these graphs, combined with technical documentation for the Vilyui HPP-1 and HPP-2 equipment, enabled the establishment of correlations between the processed signal and the operational characteristics of the equipment. An analysis of an emergency event on March 4, 2023, caused by incorrect operation of the control systems for the generating equipment at the Vilyui HPP-1 and HPP-2, confirmed that the identified signals are related to the generating equipment. The deviations of the operating equipment frequencies from their nominal values, along with the timing of technical malfunctions, were identified. In conclusion, the methodology was assessed and confirmed to be appropriate for conducting seismic and geotechnical monitoring of engineering structures located in permafrost environments.
Keywords: Vilyui HPP, seismic station, microseisms, seismic monitoring, remote control
Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the DPMGI SB RAS (No. FUFG-2024-0005), with support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment No. 075-00682-24). It also used data obtained from the unique scientific facility “Seismic and ultrasonic monitoring system of the Arctic Cryolithozone, and the continuous seismic monitoring system of the Russian Federation, adjacent territories, and the world”.
Acknowledgements. The authors express their sincere appreciation to the reviewer for the insightful and constructive feedback.
For citation: Makarov A.A., Seleznev V.S. Remote seismic monitoring of the of the first stage of the Vilyui HPP cascade using records from the “Chernyshevsky” seismic station. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):365–375. (In Russ.); https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-365-375

Введение

Плотины гидроэлектростанций относятся к особо опасным объектам с множеством факторов, ухудшающих эксплуатационные качества гидротехнических сооружений, приводящих к снижению несущей способности конструкций и изменению деформационных свойств подстилающего грунта. В эти факторы входят воздействия фильтрации, температуры, работы оборудования, сейсмичности и т. д. [1–5]. Согласно нормативным документам, на таких объектах обязательна установка автоматизированных систем мониторинга и управления инженерными системами сооружений [6, 7]. С этой целью в ФИЦ ЕГС РАН был разработан инженерно-сейсмический метод мониторинга состояния крупных промышленных объектов и ди-

станционного контроля вибрационного состояния промышленного оборудования [8–11], основанный на анализе сейсмических записей, полученных с локальных сейсмологических сетей.

В статье рассматривается подход к дистанционному сейсмическому наблюдению за работой генерирующего оборудования каскада Вилюйских гидроэлектростанций (КВГЭС-1 и КВГЭС-2). Данный энергообъект является основным источником электроснабжения Западной Якутии и обеспечивает нужды алмазной и нефтяной отраслей промышленности [12]. Немаловажным является и тот факт, что со дня запуска первого агрегата прошло более 55 лет [13]. В результате могут проявляться различные эффекты, связанные со «старением» плотины и вырабатывающего электроэнергию оборудования. Наглядным примером может являться нештатная ситуация, вызванная техническими неполадками на каскаде ГЭС, произошедшая 4 марта 2023 г. [14]. Таким образом, становятся актуальными сейсмический мониторинг работающего оборудования для обеспечения безопасной эксплуатации и изучение характера изменения излучаемого сейсмического сигнала.

Объект исследования

Верхняя ступень каскада Вилюйских ГЭС представляет собой каменно-набросную плотину с приплотинными зданиями КВГЭС-1 на правом и КВГЭС-2 – на левом берегах реки. Каждая из ГЭС оснащена четырьмя гидроагрегатами [13]. На первой станции установлены поворотно-лопастные турбины (ПЛ 70/3164-ВМ410) с гидрогенераторами (СВВ 780/190-32), а на второй – радиально-осевые турбины (РО 75/3123-В450) с генераторами (СВВ 872/150-44ХЛ4). Мощность каждой из турбин составляет 85 МВт. Общая мощность всей системы составляет 680 МВт [15]. Согласно литературным источникам, на территории исследуемого объекта проводились геофизические работы, включающие: электроразведку, термометрию и сейсморазведку правобережного примыкания плотины. В результате комплексного анализа было обосновано сложное квазистабильное термодинамическое состояние, связанное как с технологическими особенностями строительства, так и с инженерно-геокриологической обстановкой [16–18]. Это подтверждает необходимость постоянного мониторинга за энергосооружением и его оборудованием.

Исходные данные и методы обработки

Регистрация сейсмических сигналов ведется сейсмической станцией «Чернышевский», которая входит в сеть наблюдений ЯФ ФИЦ ГС РАН. Пункт наблюдения был открыт в 2011 г. на правобережье р. Вилюй в поселке Чернышевский. Он оборудован сейсмоприемником «KS-2000» и регистратором «Байкал-8». Данные передаются путем «Ethernet» соединения, что позволяет вести ежедневную запись сейсмического сигнала [19]. Сейсмостанция находится на удалении 1,256 км и 1,456 км от зданий Вилюйских ГЭС 1 и 2 соответственно (рис. 1).

Обработка сейсмических записей была произведена программным обеспечением «SpectrumSeism» путем преобразования исходного сигнала в спектры и спектрограммы. На них возможно выделить изменение амплитудно-частотного состава записи с течением времени и проследить варьирование частот, излучаемых целевыми (исследуемыми) источниками возбуждения. Построение графиков изменения сейсмических колебаний со временем для выделенных частот осуществляется посредством следующего вида оконного преобразования Фурье [20]:

$$A(\omega,t)=\left|\int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau\right|,$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда $A(\omega, t)$, $|\ldots|$ – обозначает модуль комплексного числа.

Диапазон регистрации сейсмического сигнала от исследуемого объекта ограничивается частотами 0,01 до 50 Гц. Преимуществами используемой методики являются высокая детальность в частотно-временной области и оперативность обработки, а также непрерывная регистрация сигнала без непосредственного вмешательства в работу ГЭС.

Результаты

С целью выделения частот работающего оборудования КВГЭС-1 и -2 были построены графики усреднения спектров с различными параметрами. В результате ретроспективного анализа записей 2023 г. выявлено более десятка высокодобротных сигналов. В качестве примера приведен график усреднения за трехдневный проме-

Рис. 1. Схема расположения верхней ступени каскада Вилюйских ГЭС и местоположение сейсмической станции «Чернышевский» (красный треугольник). Желтые прямоугольники – ГЭС-1 и ГЭС-2

Fig. 1. Scheme of the upper stage of the Vilyui HPP cascade and the location of the "Chernyshevsky" seismic station (red triangle). Yellow rectangles indicate HPP-1 and HPP-2

жуток с параметрами размера окна 1000 с и шагом 100 с (рис. 2, *а*).

В диапазоне частот от 0,01 до 50 Гц наблюдается более десятка монохроматических сигналов. Для большинства сейсмических пиков наблюдается закономерность распределения частот, кратных 2,273 Гц и 3,125 Гц.

Для детализации сигналов в низкочастотной области (до 5 Гц) были построены графики усреднения для максимумов, зафиксированных в данном диапазоне (рис. 2, *б*, *в*). Точность таких наблюдений составляет 0,001 Гц. Частоты 2,273 Гц и 3,125 Гц в дальнейшем условно назовем «базовые».

Для апробации метода и установления принадлежности выделенных сигналов к рассматриваемому объекту была рассмотрена нештатная ситуация, возникшая 4 марта 2023 г., в результате которой Западный энергорайон Республики Саха (Якутия) перешел на изолированную работу от Объединенной энергосистемы (ОЭС) Востока с избытком мощности на 258 МВт [14].

С целью фиксации возникновения аномалий были построены спектрограммы частот, кратных «базовым». На каждой из них отчетливо прослеживаются качания частот. Наиболее выраженный сигнал выделяется на частотах 25 Гц и 18,184 Гц (рис. 3), в 8 раз превышая «базовые» сигналы.

На часовых графиках отражаются постоянство и высокая добротность сигналов при штатном режиме работы до возникновения качаний. Для детализации развития процесса возникновения технических неполадок были построены пятиминутные графики для «базовых» частот. На них фиксируются отклонения частот от заданной на 0,035 и 0,023 Гц соответственно, а для 25 Гц оно составляет 0,271 Гц. На всех приведенных графиках отмечается интервал возникновения аномалий в интервале времени 02:40:00 – 02:45:00 GCMT (рис. 4).

Таким образом, рассматривая выделенный пятиминутный интервал, можно подробно зафиксировать время возникновения технических неполадок на КВГЭС. Для решения этой задачи и наглядности изменения амплитуд сигналов были созданы графики изменения амплитуд частот в интервале времени 02:00:00 – 04:00:00

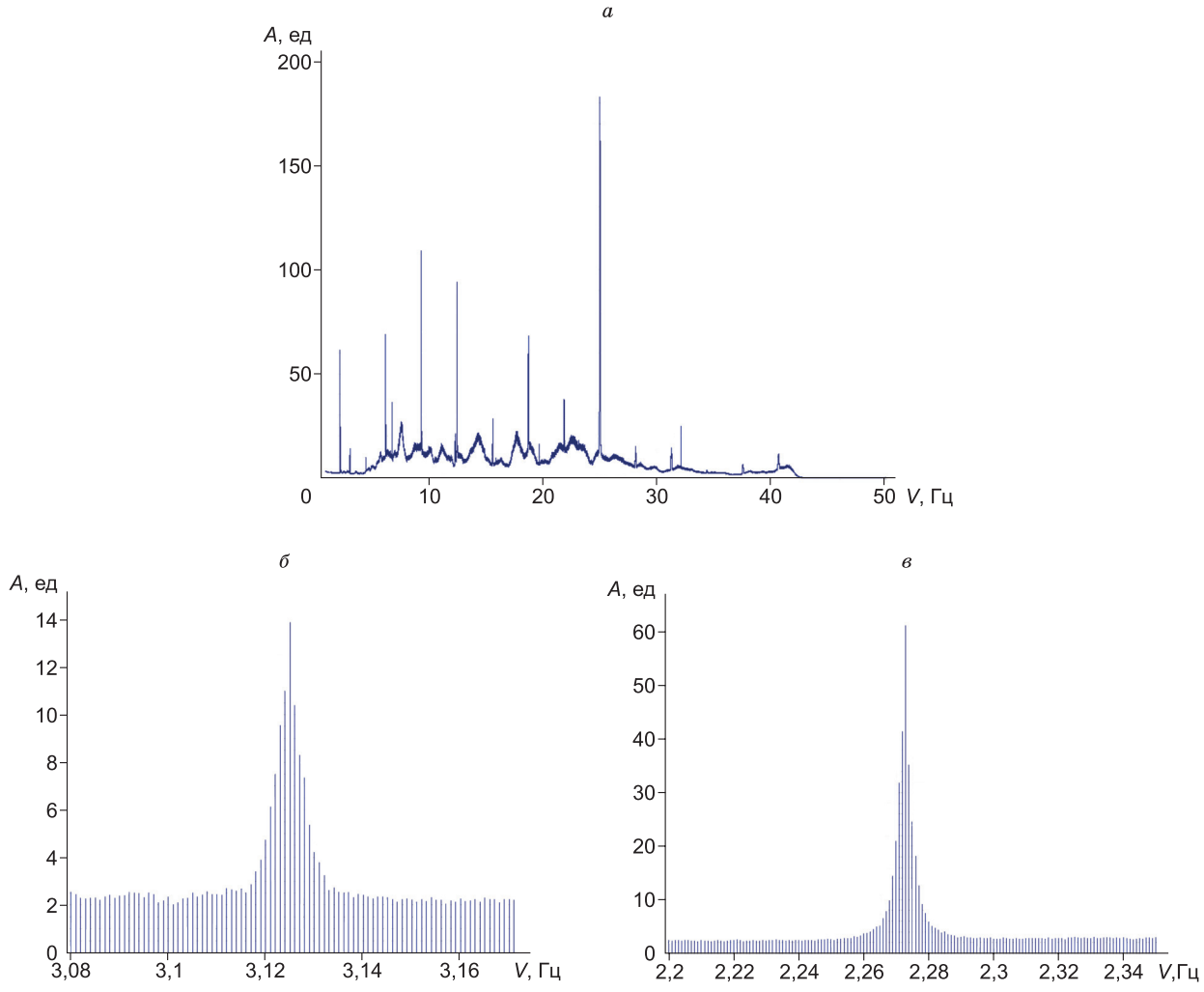

Рис. 2. Усредненный спектр за трое суток по записям сейсмической станции «Чернышевский» по каналу N (*а*) и графики усредненных спектров горизонтального канала N (*б* – оборотная частота гидроагрегатов ГЭС-1, *в* – оборотная частота гидроагрегатов ГЭС-2)

Fig. 2. *а*) Averaged spectrum over three days from the records from the "Chernyshevsky" seismic station by channel N; *б*, *в* – Graphs of averaged spectra for the horizontal channel N: *б* – turnover frequency of hydropower units of HPP-1, *в* – turnover frequency of hydropower units of HPP-2

GCMT (рис. 5) и было установлено время появления аномального сигнала. На всех рассмотренных частотах их качания зарегистрированы в 02:44:12 GCMT.

На юге и западе Якутии на спектрограммах записей сейсмостанций «Алдан», «Олёкма» и «Тында» были также зафиксированы отклонения на монохромных сигналах в интервале 24–25 Гц. На станции «Чульман» подобные отклонения отмечены в интервале 48,8–48,3 Гц в течение двух дней со дня возникновения технических неполадок, что предположительно является следствием срабатывания АЧР (автоматической частотной разгрузки). Однако наиболее информативными и наглядными являются записи со станции «Чернышевский», где наблюдаются качания частот в зависимости от времени.

Заключение

1. В результате проведенного анализа установлено, что закономерность, выделенная на суточных графиках усредненных спектров по записям сейсмической станции «Чернышевский», предположительно является следствием кавитации лопастей и износа других деталей гидротурбин КВГЭС. Аналогичная картина наблюдалась при катастрофической аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. [21].

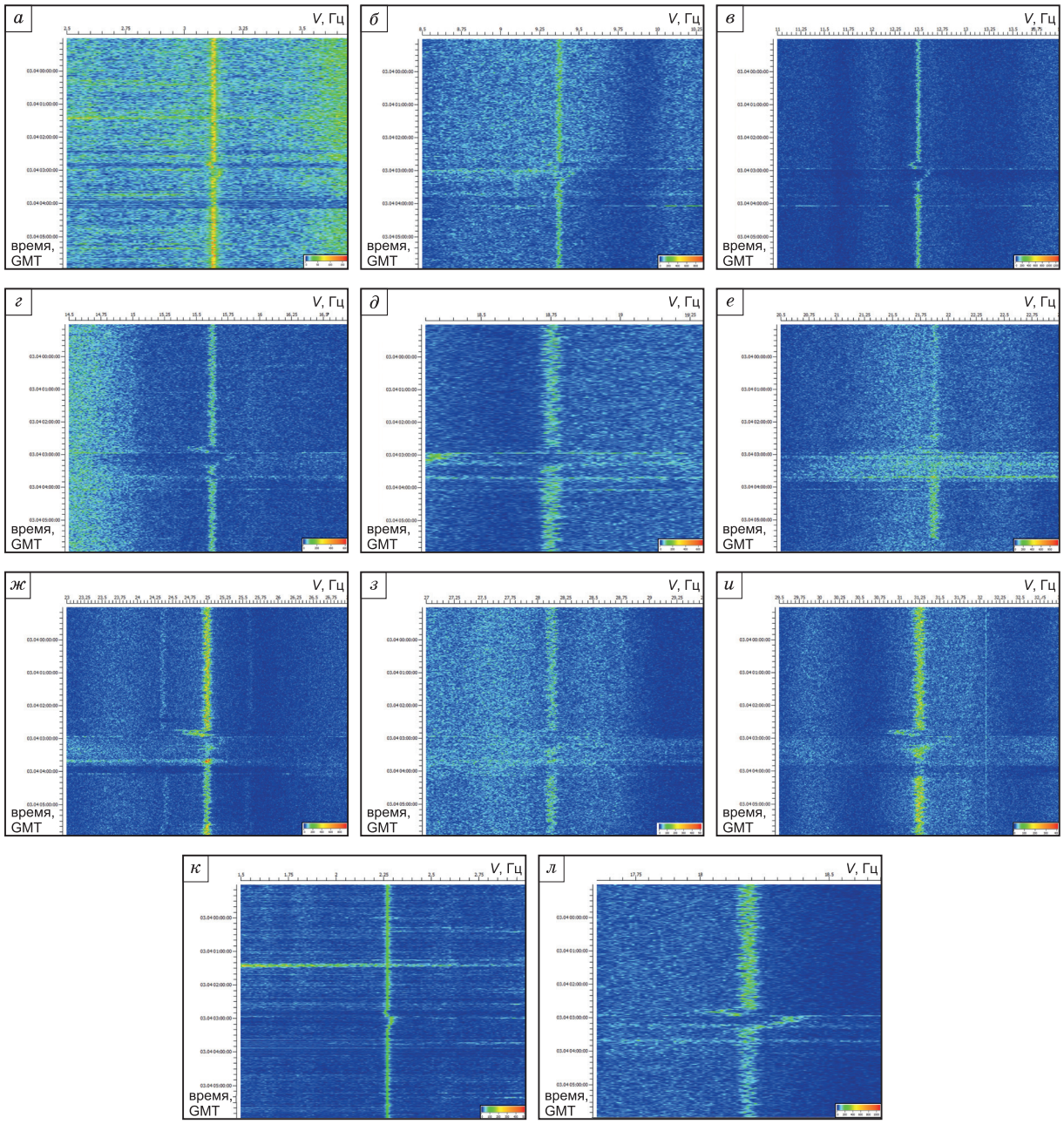

Рис. 3. Спектрограммы записей сейсмической станции «Чернышевский» по каналу N для монохромных сигналов во время технических неполадок на КВГЭС, Гц: *а* – 3,125, *б* – 6,25, *в* – 12,5, *г* – 15,625, *д* – 18,75, *е* –21,825, *ж* – 25, *з* –28,125, *и* – 31,25, *к* – 2,273, *л* – 18,184

Fig. 3. Spectrograms of recordings from the “Chernyshevsky” seismic station by channel N, showing monochrome signals during the emergency situation at the Vilyui HPP, Hz: *а* – 3.125, *б* – 6.25, *в* – 12.5, *г* – 15.625, *д* – 18.75, *е* –21.825, *ж* – 25, *з* –28.125, *и* – 31.25, *к* – 2.273, *л* – 18.184

2. Установлено, что «базовые» частоты совпадают со скоростями вращения гидрогенераторов СВВ 780/190-32 и СВВ 872/150-44ХЛ4 [22]. Этот факт позволяет утверждать, что эти частоты являются оборотными частотами 3,125 Гц и 2,273 Гц гидроагрегатов ГЭС 1 и 2, соответственно.

3. Установленная частота 25 Гц, по мнению авторов, соответствует частоте вращения лопастей КВГЭС-1 согласно уравнению Vлоп = Vоб*n, где Vлоп – лопастная частота, Vоб – оборотная частота, n – количество лопастей. Таким образом, произведение оборотной частоты, равной

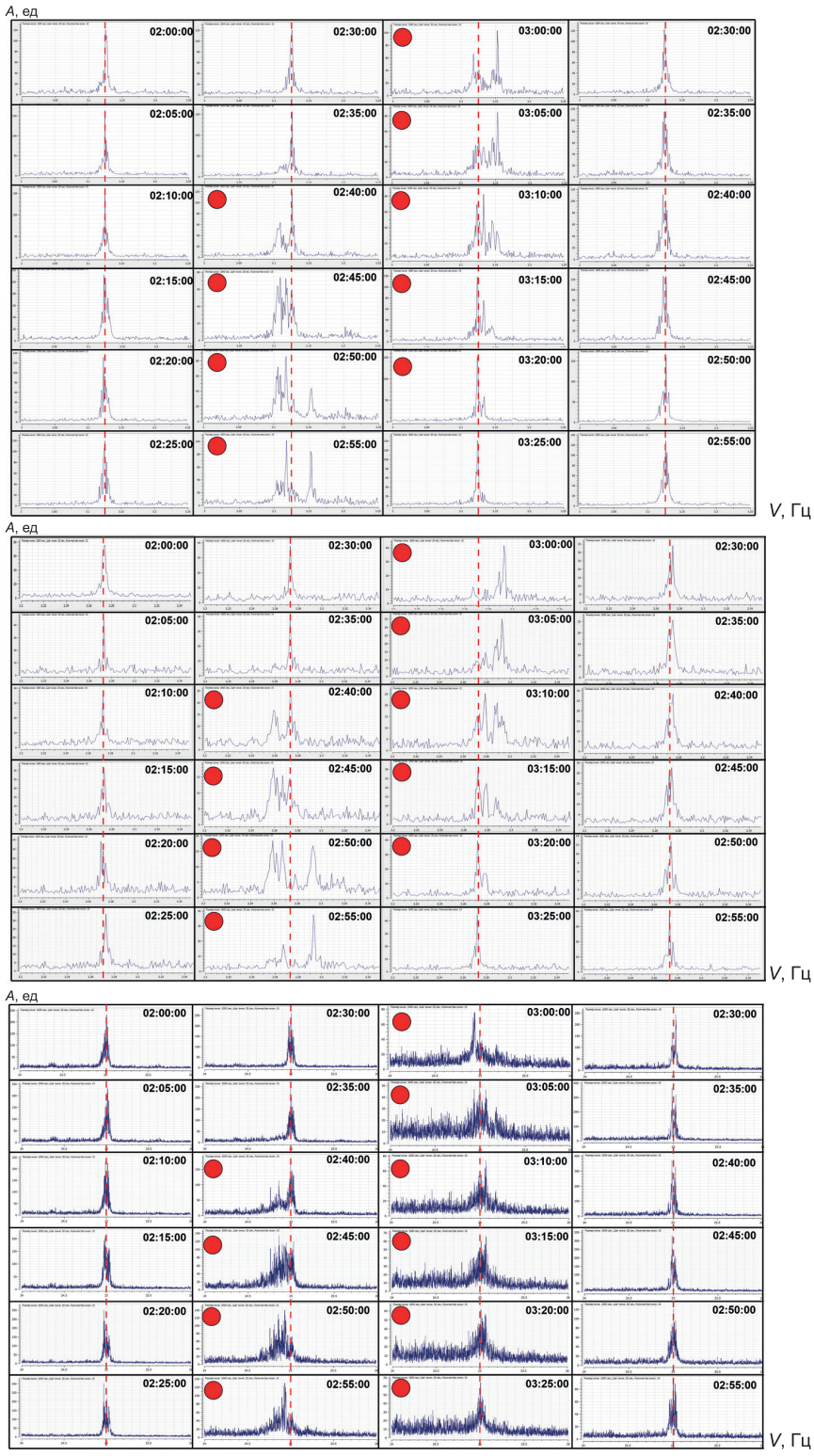

Рис. 4. Пятиминутные графики усреднения спектров записей сейсмической станции «Чернышевский» по каналу N во время технических неполадок на КВГЭС для частот 2,273, 3,125, 25 Гц. Красными кругами показаны графики с отклонениями от заданных частот

Fig. 4. Five-minute plots showing the averaged spectra of recordings from the “Chernyshevsky” seismic station by channel N during the emergency situation at the Vilyui HPP cascade for frequencies 2.273, 3.125, 25 (Hz). Red circles indicate the plots with deviations from the specified frequencies

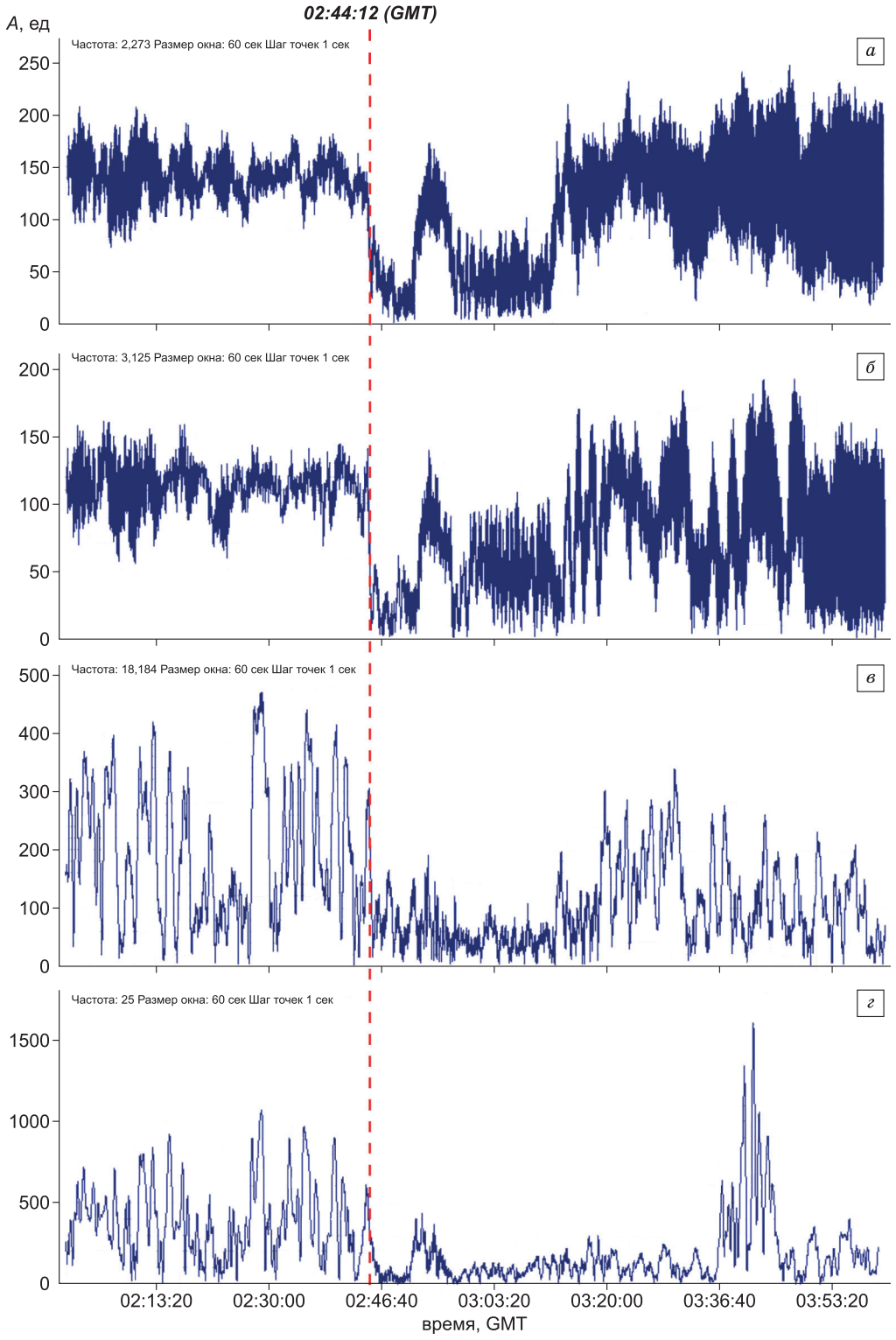

Рис. 5. Графики изменения амплитуд на частотах, Гц: *а* – 2,273, *б* – 3,125, *в* – 18,184, *г* – 25

Fig. 5. Plots showing changes in the amplitudes of frequencies, Hz: *а* – 2.273, *б* – 3.125, *в* – 18.184, *г* – 25

3,125 Гц, и количества лопастей на поворотно-лопастной турбине КВГЭС-1 (n = 8) дает в результате лопастную частоту 25 Гц.

4. Установлены диапазоны отклонений во время возникновения технических неполадок 4 марта 2023 г. оборотных и лопастных частот гидроагрегатов. Одновременное появление сейсмических аномалий на монохромных частотах позволяет утверждать, что эти сигналы связаны именно с работой турбин ГЭС-1 и ГЭС-2. В результате анализа графиков изменения амплитуд частот установлено время возникновения технических неполадок на исследуемом объекте – 02:44:12 GCMT.

Результаты исследований подтверждают возможность применения в условиях криолитозоны данной методики для контроля физических параметров агрегатов ГЭС в течение длительного времени и мониторинга других инженерных сооружений.

Список литературы / References

1. Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А. и др. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге. *Вестник Московского университета*. *Серия 4: Геология.* 2022;(6):141–151.

Sudakova M.S., Brushkov A.V., Velikin S.A., et al. Geophysical methods in permafrost monitoring. *Moscow University Geol. Bull.* 2022;(6):141–151. (In Russ.)

2. Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Несынов В.В. Геофизические методы исследования природно-техногенных изменений массивов грунтов криолитозоны. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* 2024;(5):82–94. https://doi.org/10.31857/S0869780924050087

Trifonov B.A., Milanovskii S.Yu., Nesynov V.V. Geophysical methods for the study of natural and human-induced changes in ground massifs of the permafrost zone. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya.* 2024;(5):82–94. https://doi.org/10.31857/S0869780924050087. (In Russ.)

3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Полянский П.О. и др. Сейсмические воздействия на плотину Новосибирской ГЭС. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2023;10(3):50–55. https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100308

Emanov A.F., Emanov A.A., Poljanskiy P.O., et al. Seismic impacts to Novosibirsk hydroelectric dam. *Mining Sciences: Fundamental and Applied Issues.* 2023;10(3):50–55. https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100308. (In Russ.)

4. Чжан Р.В., Великин С.А., Шестернев Д.М. Температурно-криогенный режим гидроузла Вилюйской ГЭС-1, 2: геокриологический мониторинг. *Гидротехническое строительство*. 2017;(6):10–23.

Zhang R.V., Velikin S.A., Shesternev D.M. Temperature and cryogenic regime of the Vilyuyskaya hydroelectric power station-1, 2: geocryological monitoring. *Hydraulic Structures Construction*. 2017;(6):10–23. (In Russ.)

5. Бах А.А., Еманов А.Ф., Шеболтасов А.Г. и др. Высокоточные определения методом стоячих волн характеристик собственных колебаний плотин средненапорных ГЭС. *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2025;52(1):120–131. https://doi.org/10.21455/VIS2025.1-6

Bakh A.A., Emanov A.F., Sheboltasov A.G., et al. High-precision determinations of the characteristics of natural oscillations of medium-pressure hydroelectric power station dams by the standing wave method. *Problems of Engineering Seismology.* 2025;52(1):120–131. https://doi.org/10.21455/VIS2025.1-6. (In Russ.)

6. Короленко Д.Б., Кузьменко А.П., Москвичев В.В., Сабуров В.С. Информационная система сейсмометрического мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений: опыт моделирования, разработки и внедрения. *Вычислительные технологии.* 2019;24(5):13–37. https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.5.003

Korolenko D.B., Kuzmenko A.P., Moskvichev V.V., Saburov V.S. Information system for seismometric monitoring of technical condition of hydraulic structures: experience in modelling, development and implementation. *Computational Technologies.* 2019;24(5):13–37. https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.5.003. (In Russ.)

7. ГОСТ Р 55260.1.5-2012 Гидроэлектростанции. Часть 1-5. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования к проектированию в сейсмических районах. заявл. 01.07.2014 : опубл. 04.03.2023 / Зотова Г.В., Прусакова В.Н., Ментова Р.А.

GOST R 55260.1.5-2012 Hydro power plants. Part 1-5. Hydrotechnical constructions of hydroelectric power stations. Requirements for projection in seismic areas. Registered 07.01.2014; published 03.04.2023 / Zotova G.V., Prusakova V.N., Mentova R.A. (In Russ.)

8. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Коковкин И.В., Соловьев В.М. Изменение значений частот собственных колебаний зданий и сооружений в зависимости от внешних факторов. *Геология и геофизика*. 2024;65(7):1036–1044. https://doi.org/10.15372/GiG2024102

Seleznev V.S., Liseikin A.V., Kokovkin I.V., Solovyov V.M. Change in natural oscilaton frequencies of buildings and structures depending on external factors. *Russian Geology and Geophysics*. 2024;65(7):1036–1044. https://doi.org/10.15372/GiG2024102. (In Russ.)

9. Патент № 2461847 Российская Федерация, МПК G01V 1/28 G01M 7/02. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления: № 2010128394/28: заявл. 08.07.2010 : опубл. 20.09.2012 / Селезнев В.С., Лисекин А.В., Брыксин А.А.

Patent No. 2461847, Russian Federation, IPC G01V 1/28 G01M 7/02. A method for continuous monitoring of the physical condition of buildings and a method for continuous monitoring of the physical condition of buildings and/or structures and a device for its implementation: No. 2010128394/28; registered 07.08.2010; published 09.20.2012 / Seleznev V.S., Lisekin A.V., Bryksin A.A. (In Russ.)

10. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Методика дистанционного контроля разрушительных процессов по малоамплитудным сейсмическим сигналам при эксплуатации крупных промышленных объектов. *Вопросы инженерной сейсмологии.* 2024;51(3):86–106. https://doi.org/10.21455/VIS2024.3-5

Liseikin A.V., Seleznev V.S. An approach for remote control of destructive processes by low-amplitude seismic signals during service of large industrial facilities. *Problems of Engineering Seismology.* 2024;51(3):86–106. https://doi.org/10.21455/VIS2024.3-5. (In Russ.)

11. Брыксин А.А., Громыко П.В., Севостьянов Д.Б. Использование регистраторов «Байкал-8» для сейсмического мониторинга зданий и сооружений в режиме реального времени в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. *Российский сейсмологический журнал*. 2022;4(3):68–80. https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.06

Bryksin A.A., Gromyko P.V., Sevostyanov D.B. Using the Baikal-8 recorders for seismic monitoring of buildings and structures in real time in Seismological Branch of the GS RAS. *Russian Journal of Seismology*. 2022;4(3):68–80. https:// doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.06. (In Russ.)

12. Лаппарова И.Ф. Новый этап в энергетическом развитии Якутии с конца 50-х по 80-е гг. XX в. В кн.: Роднина Н.В. и др. (ред.) *Аграрная наука: от философии до экономики : Сборник научных статей внутривузовской научно-практической конференции экономического факультета, посвященной 65-летию высшего аграрного образования Республики Саха (Якутия) и 100-летию образования Якутской АССР, г. Якутск, 03 октября 2022 года.* Якутск: Издательский дом СВФУ; 2022. С. 119–121.

Lapparova I. F. A new stage in the energy development of Yakutia from the late 50s to the 80s of the twentieth century. In: Rodnina N.V., et al. (eds.) *Agrarian science: from philosophy to economics : Collection of scientific articles at the intrauniversity scientific and practical conference of the Faculty of Economics, dedicated to the 65th anniversary of higher agricultural education in the Republic of Sakha (Yakutia) and the 100th anniversary of the establishment of the Yakut ASSR, Yakutsk, October 03, 2022.* Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022, pp. 119–121. (In Russ.)

13. Дворецкая М.И., Жданова А.П., Лушников О.Г., Слива И.В. *Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России: справочник.* СПб.: Изд-во Политехнического ун-та; 2018. 224 с.

Dvoretskaya M.I., Zhdanova A.P., Lushnikov O.G., Sliva I.V. *Renewable energy. Hydroelectric power plants of Russia*. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House. 2018. 224 p. (In Russ.)

14. Коковкин И.В., Селезнев В.С., Дежнев В.Э., Лопатин Г.А. Разработка сейсмических методов для мониторинга геомеханического состояния Саяно-Шушенской ГЭС. *Геология и геофизика*. 2025;66(2):247–256. https://doi.org/10.15372/GIG2024155

Development of seismic methods for monitoring the geomechanical condition of the Sayano-Shushenskaya HPP. *Russian Geology and Geophysics.* 2025;66(2):247–256. https://doi.org/10.15372/GIG2024155. (In Russ.)

14. *Сайт Ленского управления Ростехнадзора*. Режим доступа: https:// lensk.gosnadzor.ru (дата обращения: 09.04.2025)

Website of the Lena Department of Rostechnadzor. Available at: https:// lensk.gosnadzor.ru (accessed: 09.04.2025) (In Russ.)

15. Абрамов А.А. Реконструкция электрических сетей напряжением 110 кВ Республики Саха (Якутия) в связи с подключением подстанции Маччоба: Бакалаврская работа. Благовещенск. 2021. 118 с.

Abramov A.A. Reconstruction of 110 kV electrical networks in the Republic of Sakha (Yakutia) in connection with the connection of the substation Machchoba: Bachelor's thesis, Blagoveshchensk. 2021. 118 p. (In Russ.)

16. Неклюдов В.В. Идентификация инженерно-геологического строения массива пород в криолитозоне нестандартными методами инженерной сейсмики. *Разведка и охрана недр.* 2014;(3):37–42.

Neklyudov V.V. Identification of the engineering geological structures of permafrost rocks by means of nonstandard engineering seismic methods. *Prospect and Protection of Mineral Resources.* 2014;(3):37–42. (In Russ.)

17. Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В. *Грунтовые плотины в криолитозоне России*. Новосибирск: Академическое издательство «Гео»; 2019. 427 с. https://doi.org/10.21782/B978-5-6043021-1-8

Zhang R.V., Velikin S.A., Kuznetsov G.I., Kruk N.V. *Embankment dams in the Russian permafrost zone.* Novosibirsk: Geo Publ. 2019. 427 p. https://doi.org/10.21782/B978-5-6043021-1-8. (In Russ.)

18. Великин С.А., Снегирев А.М. Локальный геофизический мониторинг состояния правобережного примыкания плотины Вилюйской ГЭС-1. Вестник КРАУНЦ. *Серия: Науки о Земле*. 2005;2(6):77–85.

Velikin S. A., Snegirev A.M. Local geophysical monitoring of the right-bank continuity of the dam at the Vilyuy Hydroelectric Power Plant. *Bulletin KRASEC. Sciences of the Earth*. 2005;2(6):77–85. (In Russ.)

19. *Сейсмологический бюллетень* (*сеть телесейсмических станций*), 2020. (2024). *ФИЦ ЕГС РАН [сайт] Режим доступа:* http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2020/ (дата обращения: 09.04.2025)

Seismological Bulletin (network of teleseismic stations), 2020. (2024). Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS) [website] Available at: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2020 / (accessed: 04.09.2025) (In Russ.)

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666241 Российская Федерация. SpectrumSeism : № 2021665611 : заявл. 11.10.2021 : опубл. 11.10.2021 / Селезнев В.С. Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А.

Certificate of State Registration for Computer Programme No. 2021666241 Russian Federation. SpectrumSeism : No. 2021665611 : registered 11.10.2021 : published 11.10.2021 / Seleznev V.S., Liseikin A.V., Sevostyanov D.B., Bryksin A.A. (In Russ.)

21. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС. *Гидротехническое строительство*. 2013;(7):2–7.

Seleznev V.S., Liseikin A.V., Alzhanov R.Sh., Gromyko P.V. The effect of the operation of hydraulic units on the natural vibrations of the Sayano-Shushenskaya HPP dam. *Hydraulic Structures Construction*. 2013;(7):2–7. (In Russ.)

22. *НПО «ЭЛСИБ» ПАО*. Режим доступа: https://elsib.ru/ru/services/gidrogeneratory/ (дата обращения: 09.04.2025)

NPO 'ELSIB' PAO. Available at: https://elsib.ru/ru/services/gidrogeneratory/ (accessed: 09.04.2025) (In Russ.)

Об авторах

МАКАРОВ Александр Александрович, ведущий инженер; ведущий инженер-геофизик (совместитель), https://orcid.org/0000-0001-6527-5863, ResearcherID: HKD-9633-2023, SPIN: 6462-8845, e-mail: Makarov.2A@yandex.ru

СЕЛЕЗНЕВ Виктор Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-2366-550X, ResearcherID: I-9924-2018, Scopus Author ID: 7006319338, SPIN: 9354-5200, e-mail: svs0428@mail.ru

Вклад авторов

Макаров А.А. – проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация, верификация данных, проведение статистического анализа; **Селезнев В.С.** – руководство исследованием, редактирование рукописи, разработка концепции, методология

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

MAKAROV, Alexander Alexandrovich, Leading Engineer; Leading Engineer-Geophysicist, https://orcid.org/0000-0001-6527-5863, ResearcherID: HKD-9633-2023, SPIN: 6462-8845, e-mail: Makarov.2A@yandex

SELEZNEV, Victor Sergeevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Researcher, https://orcid.org/0000-0003-2366-550X, ResearcherID: I-9924-2018, Scopus Author ID: 7006319338, SPIN: 9354-5200, e-mail: svs0428@mail.ru

Authors' contribution

Makarov A.A. – investigation, writing – original draft, visualization, validation, formal analysis; **Seleznev V.S.** – supervision, writing – review & editing, conceptualization, methodology

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 25.08.2025
Поступила после рецензирования / Revised 08.09.2025
Принята к публикации / Accepted 10.09.2025