

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ПЕЩЕР В АРКТИКЕ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Г. Н. Антоновская<sup>1</sup>, И. М. Басакина<sup>1</sup>, Н. В. Ваганова<sup>1</sup>, А. М. Царев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (Архангельск, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Институт криосферы Земли — обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (Тюмень, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 2 июля 2025 г.

### Для цитирования

Антоновская Г. Н., Басакина И. М., Ваганова Н. В., Царев А. М. Сейсмические исследования карстовых пещер в Арктике: первые результаты // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 4. — С. 508—518. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-508-518.

*Представлены первые результаты сейсмических исследований пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя, расположенной в Пинежском округе Архангельской области, причисленном к Арктической зоне Российской Федерации. Результаты обработки данных высокоразрешающей сейсморазведки на SH-волнах позволили установить признаки выделения карстовых полостей и зон трещиноватости. Для изучения динамики формирования и развития карстовых процессов в районе пещерной системы установлена временная сеть сейсмического мониторинга. Первые результаты регистрации сейсмических событий разного типа подтверждают ее высокую чувствительность.*

**Ключевые слова:** карстовые процессы, сейсморазведка МОГТ, поперечные SH-волны, временная сейсмическая сеть.

### Введение

Предупреждение природных и природно-техногенных аварий на закарстованных территориях — актуальная проблема для Арктической зоны Российской Федерации. Благодаря своей уникальности, характеризующейся сложными геологическими и морфологическими особенностями [1—3], карст является чрезвычайно сложной средой с точки зрения геотехнической инженерии [4].

В последние годы из-за сильных подземных паводков проблема обострилась, и увеличилось количество карстовых провалов в Архангельской об-

ласти, о чем неоднократно упоминалось в местной прессе <sup>1</sup>. Карстующиеся породы занимают около 30% данной территории, протягиваются с севера на юг, юго-запад через всю территорию области, имеют протяженность 600 км и ширину 100—200 км [2]. В связи с этим для предупреждения природных и природно-техногенных аварий на закарстованных территориях необходимо наиболее полное представление о характере развития и динамике проявления карста и других экзогенных геологических процессов, сопутствующих его развитию.

<sup>1</sup> В Архангельской области из-за паводка возросло число карстовых провалов. — Интерфакс. — 2020. — 25 сент. — URL: <https://www.interfax.ru/russia/728642>.

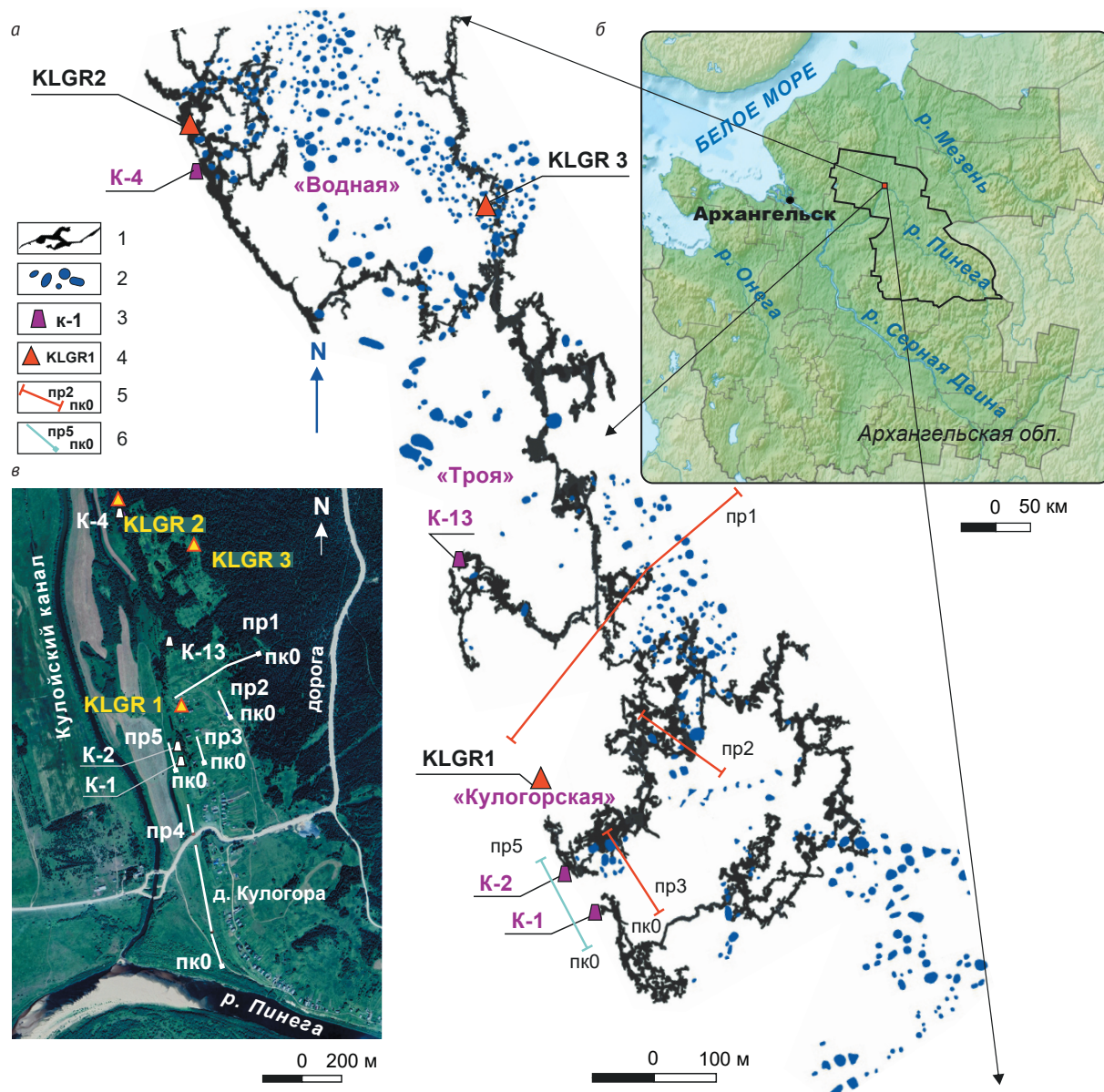


Рис. 1. Схема расположения участка исследований на территории пещерной системы Кулогорская – Водная – Троя: а – схема расположения пещер и воронок [1], геопозиция пещерной системы на карте Архангельской области (б) и на схеме Google Earth (в). Обозначения: 1 – пещерные ходы, 2 – воронки, 3 – вход в пещерные системы, 4 – места установки сейсмических станций. Профили сейсморазведочных работ: 5 – в пределах системы Кулогорская – Троя, 6 – за пределами системы в пойме  
Fig. 1. Layout of the research site in the Kulogorskaya – Vodnaya – Troya cave system: а – layout of caves and sinkholes [1], geolocation of the cave system on the map of the Arkhangelsk region (б) and on the Google Earth scheme (в). Designations: 1 – cave passages, 2 – sinkholes, 3 – entrance to cave systems, 4 – location of temporary seismic stations. Profiles of seismic exploration surveys: 5 – within the Kulogorskaya – Vodnaya – Troya system; 6 – outside the system in the floodplain

Еще с середины прошлого века [5] и в настоящее время геофизические исследования являются самым распространенным подходом для обнаружения и изучения карстовых процессов [6], существуют специальные рекомендации по изучению зон закарстованности<sup>2</sup>. Одним из инструментов для решения таких задач является инженерная сейсморазведка.

Этот геофизический метод в силу своих физических принципов дает возможность получать изображение геологической среды — геометрию и форму границ, а также ее прочностные и деформационные характеристики [7].

Объектом исследования в данной работе является пещерная система Кулогорская — Водная — Троя, расположенная в Пинежском округе Архангельской области (рис. 1).

Пещерная система Кулогорская — Водная — Троя является одной из крупнейших карстовых систем Европейского Севера, частично или полностью

<sup>2</sup> Рекомендации по геофизическому исследованию закарстованности территорий, предназначенных для строительства / Госстрой РСФСР. — М., 1971. — URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294815/4294815113.htm>.

затапливаемая водой, особенно в период паводков, и относится к паводково-транзитному типу. Протяженность системы превышает 20 км, включает множество галерей, залов и карстовых воронок, размеры которых могут достигать 150 м в диаметре и 25 м в глубину [1]. В пещере Водная (К-4) силами спелеологической организации АСА «Лабиринт» установлена система комплексного мониторинга подземного пространства, включающая цифровые термометры, барометрические датчики и ультразвуковые датчики расстояния для измерения с высокой точностью уровня воды в пещерах.

Целью данной статьи являются выделение признаков карстовых полостей и зон трещиноватостей методом высокоразрешающей сейсморазведки на SH-волнах и представление системы сейсмического мониторинга для изучения динамики карстовых процессов.

### Геологическое строение района

Исследуемая пещерная система расположена в пределах Средне-Пинежского грабена Мезенской синеклизы, которая с востока испытывает тектонические напряжения Тиманского кряжа. Согласно аэрогеологическим исследованиям <sup>3</sup>, в верхних горизонтах осадочного чехла (палеозой, мезозой, кайнозой) зафиксированы проявления глубинных разломов, сопровождающиеся зонами повышенной трещиноватости, карстовыми провалами и активным воздействием подземных вод и реки Пинеги. Плотность гидросети в высокой степени связана с проявлениями в рельефе тектонических структур кристаллического фундамента. Существуют методики определения канальной сети современного рельефа, которые позволяют выделять малоамплитудные тектонические нарушения осадочного чехла и структуры с повышенной активностью современной тектоники [8].

Основой для формирования карстовых полостей послужили легко растворимые в воде породы. Карстующийся разрез начинается на глубине более 120 м трещиноватыми доломитами, известняками ассель-сакмарского яруса нижней перми ( $P_1as$ ) мощностью 50–60 м. Вышележащие слои соткинской свиты ( $P_1sot$ ) мощностью до 50 м слагают гипсы, ангидриты с редкими прослоями доломитов, алевролитов, глин. Далее разрез представлен переслаивающимися породами сакмарского яруса кулогорской свиты ( $P_1kl$ ): гипсами, доломитами, реже мергелями, органическими известняками и селенитами мощностью до 9 м. Завершают разрез озерно-ледниковые

четвертичные отложения: пески, суглинки и супеси мощностью от 0,5 до 3 м, что усложняет поверхностное картирование [1].

На исследуемой территории из доледниковых форм рельефа можно выделить карстовые лого, озерные ванны, из ледниковых — шелопники. На современном этапе происходит развитие пещер, воронок и обвалов. Карстовые пещеры развиваются в северо-западном и субмеридиальном направлениях (см. рис. 1) подобно зоне развития Пинего-Кулойского разлома и Тиманского кряжа.

Пещерная система Кулогорская — Водная — Троя выделяется высокой плотностью карстовых форм — до 43 воронок на 10 000 м<sup>2</sup>. Размеры воронок варьируются от небольших (2 м в диаметре) до крупных (150 м в диаметре и 25 м в глубину) [1; 2]. Большинство из них относится к коррозионно-суффозионному типу и имеет вертикальные каналы сечением от 0,4 до 3 м, часто заполненные рыхлым материалом, таким как песок и глина.

Геолого-тектоническое районирование платформенного чехла проводилось в 1994 г.<sup>4</sup> в масштабе 1:2 500 000. Глубина фундамента в районе Керецкого-Пинежского прогиба оценивается в диапазоне от 2,5 до 4 км. Ранее связь глубинного строения с развитием карстовых форм детально не изучалась, а деформации сводились к зонам повышенной трещиноватости и разрывным нарушениям. Наблюдения в бассейне Пинеги и на Беломорско-Кулойском плато <sup>5</sup> на коренных обнажениях выявили прямое отражение глубинных разломов в верхних горизонтах осадочного чехла.

Крупные карстовые формы на поверхности представлены логами длиной до 200 м, а внутри пещер повсеместно встречаются обвальные отложения в виде щебнисто-глыбовых тел. Эти особенности указывают на активные геодинамические процессы, которые продолжают формировать и разрушать пещерную систему.

### Методика исследования

Для выявления признаков карстовых полостей в районе развития пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя (см. рис. 1) применялась высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных SH-волнах. Использовалась центральная расстановка, при которой пункты возбуждения располагались в центре приемной линии. При переносе первой «отстреленной» части косы пункты возбуждения продолжают по линии наблюдений, а вся прием-

<sup>3</sup> Розанов В. И., Бузов В. Н., Варганова В. Н. Отчет о результатах проведения аэрофотогеологической съемки масштаба 1:200 000 по листам Q-38-XVI, XVII, XVIII, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXVII, XXVIII, XXXIII, XXXIV, XXXV, XXXVI; Q-39-XIII, XIX, XXV, XXXI (партия № 4 работы 1971–1976 гг.) / Архангельский ТГФ. — [Б. м.], 1976. — 943 с. — Инв. № 3352. — (Исполнитель — НПО Аэрогеология, Комплекс. аэрогеол. экспедиция № 14).

<sup>4</sup> Малков В. Н. Отчет по составлению геологических карт карстующихся пород масштаба 1:2 500 000 и 1:1 000 000 на территорию Архангельской области (Карстовый объект 1993–1994 гг.) / Архангельский ТГФ. — [Б. м.], 1994. — Инв. № 8092.

<sup>5</sup> Малков В. Н., Николаев Ю. И., Кузнецова В. А. и др. Отчет по изучению экзогенных геологических процессов в бассейне р. Пинеги и на Беломорско-Кулойском плато / Архангельский ТГФ. — [Б. м.], 1983. — Инв. № 5838. — 401 с.



ная линия перемещается на то же расстояние. Пункты возбуждения при каждом положении остаются в центре приемной линии [9; 10]. Совмещение двух этих принципов дает методику высокого разрешения сейсмического профилирования SH-волн. В обработке применялся метод общей глубинной точки (МОВ-ОГТ). Известно, что поперечные SH-волны более эффективны для выявления зон разломов и трещин, так как они чувствительны к сдвигам в породах и имеют меньшие скорости, чем Р-волны, что влияет на детальность получаемого разреза.

Измерения велись с применением телеметрических систем ТЕЛСС-402 и ТЕЛСС-3 с числом каналов от 24 до 48 (в зависимости от длины профиля), которые обеспечивают высокую точность и сохраняют результаты в формате SEG-Y. Выбран шаг дискретизации 0,25 мс, что позволяет регистрировать сигнал в диапазоне 10—1000 Гц. Источником сейсмических волн служили удары кувалдой, а приемники (геофоны) располагались вдоль профилей с шагом 2 м (см. рис. 1б и 1в). Для изучения всей толщи разреза длина расстановки и шаг между пунктами возбуждения и пунктами приема выбирались так, чтобы максимальное удаление между пунктами возбуждения и приема было сопоставимо с глубиной исследования. Обработка и интерпретация результатов МОВ-ОГТ проводились с использованием системы программ «RadExPro».

В обработке применялись разные базы суммирования по удалениям для послойного глубинного анализа распространения нарушений. По профилям строились временные разрезы. В итоге эмпирическим путем была подобрана оптимальная схема сейсморазведочных наблюдений для выявления карстовых полостей со следующими характеристиками: расстояние между пунктами приема — 2 м, возбуждения — 4 м в пойме и 2 м на равнине, число одновременной записи каналов — 48. Для повышения отношения сигнал/помеха выполнялось накопление сигнала путем повторения возбуждающих ударов на одном пункте в количестве 8 раз. Всего было отработано 5 профилей: профили 1, 2, 3 на плато (на равнине) и профили 4, 5 в пойме (см. рис. 1).

Для изучения геодинамической ситуации пещерной системы была установлена временная система сейсмического мониторинга, состоящая из трех сейсмических станций, с конфигурацией размещения в виде вытянутого треугольника (см. рис. 1). На первом этапе в качестве объекта исследований была выбрана пещера Водная (вход через К-4), единственная имеющая инфраструктурное обеспечение для подключения электропитания, GPS-антенны и передачи данных с временных сейсмических станций. Один комплект оборудования был установлен внутри пещеры Водная (К-4) (сейсмической станции присвоен код KLGR2), два других комплекта — на поверхности земли над пещерным комплексом (станциям присвоены коды KLGR1

и KLGR3). Разместить все сейсмические станции внутри пещерной системы не представлялось возможным в силу того, что она периодически затопляется водой. Данное обстоятельство является негативным фактором для функционирования сейсмического оборудования. Внутри пещеры Водная (вход К-4) было найдено одно потенциально «сухое» место, в котором был установлен комплект из трех короткопериодных велосометров CM-3KB, подключенных к регистратору GeoSIG GSR-24 с GPS-приемником Garmin GPS-16. На поверхности установлены цифровые широкополосные велосометры CMG-6TD. Со всех трех комплектов данные в режиме онлайн поступают на сервер лаборатории сейсмологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (ФИЦКИА Уро РАН). Началом мониторинга считаем 20 марта 2025 г.

## Результаты

Метод МОВ-ОГТ позволил построить глубинные сейсмические разрезы по профилям, которые отображают залегания пород в подземных структурах на глубинах до 100 м (рис. 2а—2д). На всех временных разрезах сейсморазведочных профилей выявлены признаки зон трещиноватости, которые отражаются в виде потери корреляции горизонтов. Рассмотрим наиболее характерные выделенные особенности исследуемой площади.

Профиль 1 пересекает пещеру Троя. Его протяженность составляет 546 м, он протягивается с северо-востока на юго-запад (см. рис. 1б). По результатам применения МОВ-ОГТ выявлены потери корреляции в верхнем горизонте доломитов на глубинах 5—10 м, которые на дневной поверхности проявляются в виде воронок вдоль профиля (рис. 2а). В районе пикетов 190—210 м верхняя толща переслаивающихся доломитов и гипсов опускается приблизительно на 3 м, что дает основание локализовать область повышенной трещиноватости в данной разломной зоне. На глубинах около 19 м предположительно горизонт доломитов (отмечен желтой линией на рис. 2а) становится прерывистым, что связано с развитием карста и подтверждается схемой пещерной системы (см. рис. 1).

Профиль 2 частично пересекает пещеру Кулогорская, его протяженность составляет 144 м (см. рис. 1б). На полученном разрезе (см. рис. 2б) в верхней толще переслаивающихся доломитов и гипсов (пикеты 72 м, 86 м и 100 м) наблюдаются блоки просевшей породы, которые отражаются на временном разрезе в виде зоны потери корреляции горизонтов. На глубинах 19—22 м и далее выделяются зоны разуплотнения в породе, маркером служит отсутствие амплитуд, возможно, это пустоты.

На первом этапе проведен анализ сочленения пещеры Кулогорская с палеопоймой Пинеги (перепад высот составляет 17—20 м). Были отработаны про-

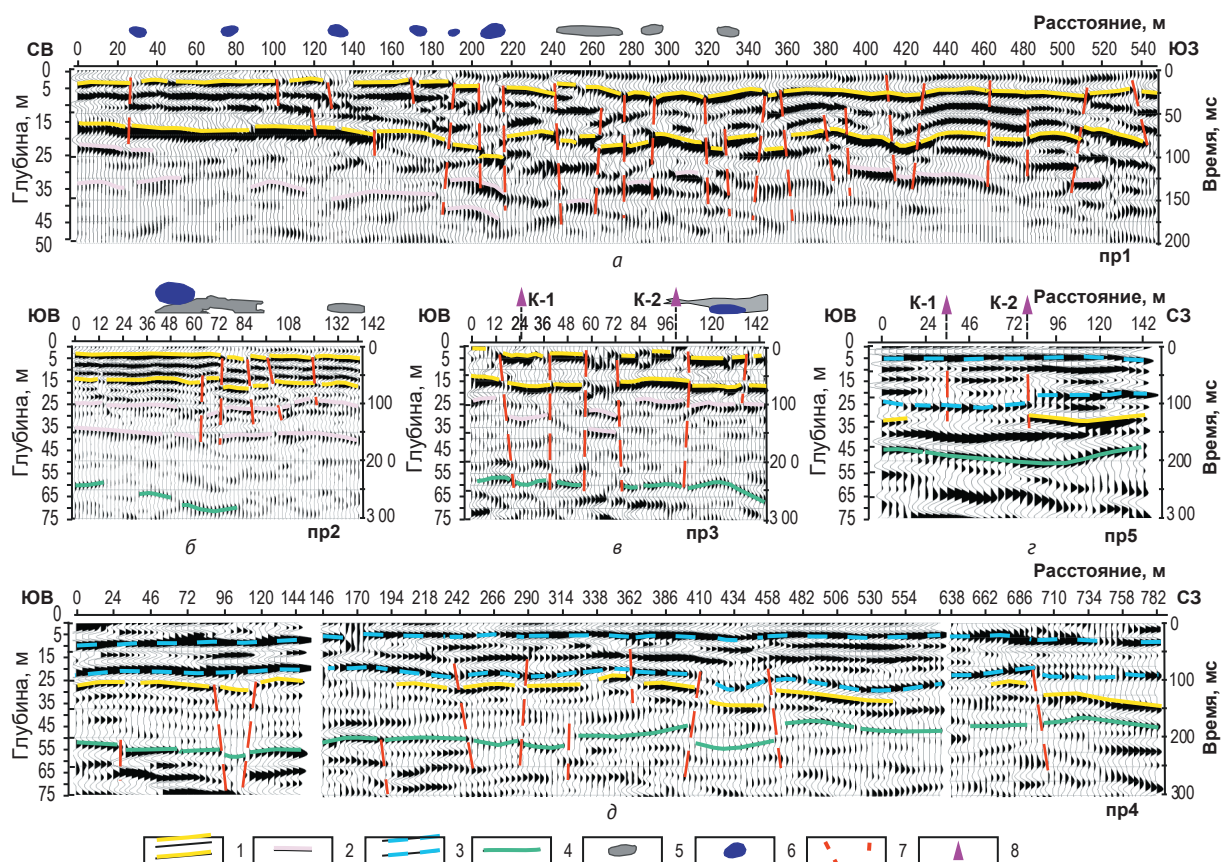


Рис. 2. Глубинно-временные сейсмические разрезы по профилям: а – пр1, б – пр2, в – пр3, з – пр5; д – пр4 (расположение см. на рис. 1). Обозначения: отражающие горизонты карбонатных пород: 1 – переслаивание доломитов, гипсов, органогенного известняка, селенитов, 2 – прослой ангидрита, глин в слое гипса, 3 – озерно-ледниковые четвертичные отложения, 4 – предположительно горизонт известняков, 5 – пещерные ходы, 6 – воронки, 7 – нарушения в породе: зоны трещиноватости и потери корреляции горизонтов, 8 – знак расположения входа в пещеру

Fig. 2. Depth-time seismic sections along the profiles: а – пр1, б – пр2, в – пр3, з – пр5, д – пр4 (for location see Fig. 1). Designations: reflecting horizons of carbonate rocks: 1 – interlacing of dolomites, gypsum, organogenic limestone, selenites, 2 – roof or base of the upper layer of gypsum and anhydrite, 3 – lacustrine-glacial Quaternary deposits, 4 – presumably, limestone horizon, 5 – cave passages, 6 – sinkholes, 7 – presumably rock collapses or a zone of voids in a cave, 8 – mark of the cave entrance location

фили 3 и 5 (см. рис. 1). Профиль 3 находится над пещерой, а профиль 5 расположен в палеопойме на расстоянии 25 м от входов К-1 и К-2 в пещеру (см. рис. 16, 1в).

На профиле 3 обнаружены зоны потери корреляции в верхних горизонтах доломитов и гипсов, которые, как «бусины» на линии горизонта, показывают места будущих воронок — провалов (см. рис. 2в). По обеим сторонам от оси входа в пещеру К-1 фиксируется дифракционная волна (дугообразная), которая свидетельствует о наличии нарушения и зачастую является признаком открытой карстовой полости. В районе входа в пещеру К-2 на глубине 5 м обнаружено отсутствие корреляции горизонта, на глубинах 15 м выделено понижение горизонта и зоны трещиноватости (см. рис. 2в).

На профиле 5 под озерно-ледниковыми четвертичными отложениями в пойме отмечаются малоамплитудные нарушения (см. рис. 2г). Выявлена зона потери корреляции в горизонте доломитов (желтая линия на рис. 2г) на глубинах 30—35 м.

Профиль 4 находится в палеопойме Пинег (см. рис. 1в). Выделены озерно-ледниковые четвертичные отложения мощностью 20—25 м, подстилающиеся прерывистым горизонтом, предположительно доломитов (см. рис. 2д). Под доломитами в гипсово-ангидритовой толще выявлены характерные прогибы и зоны трещиноватости, что связано с развитием карста, например зона в районе пикетов 410—470 м на глубинах 35 и 55 м.

Проанализируем оценку уровня микросейсмического фона района размещения временной системы сейсмического мониторинга. На рис. 3 показаны характерные суточные спектры мощности микросейсмического фона в сравнении со среднемировыми кривыми шума Петерсона [11]. Такие оценки необходимо всегда делать перед началом работ, так как уровень шума напрямую влияет на качество сейсмических измерений.

Как видно из рис. 3, уровень фона во всех пунктах размещения сейсмической аппаратуры можно охарактеризовать как низкий за исключением области

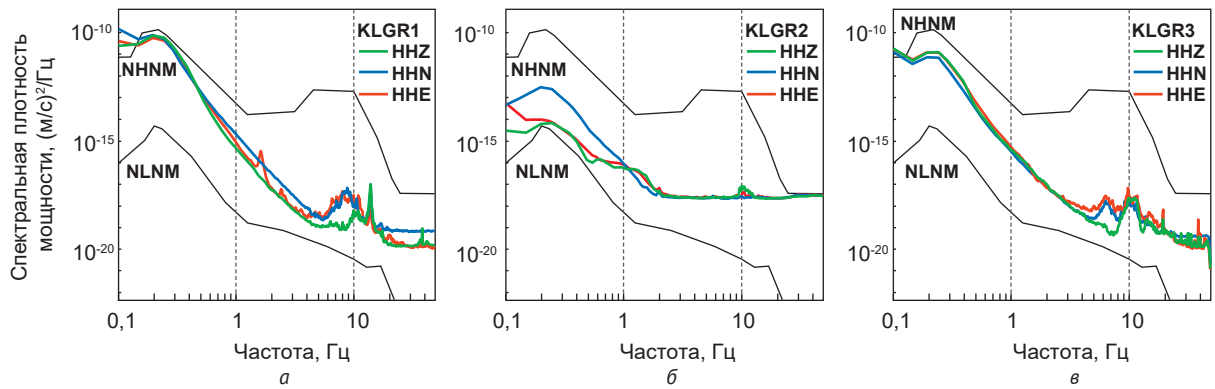


Рис. 3. Спектральная плотность мощности микросейсмического фона в сравнении с нижнеуровневой (NLNM) и верхнеуровневой (NHNM) моделями Петерсона [11]. Сейсмические станции: а – Кулогоры1 (KLGR1), б – Кулогоры2 (KLGR2), в – Кулогоры3 (KLGR3)

Fig. 3. Power spectral density of microseismic background in comparison with Peterson's lower-level (NLNM) and upper-level (NHNM) models [11]. Seismic stations: а – KLGR1, б – KLGR2, в – KLGR3

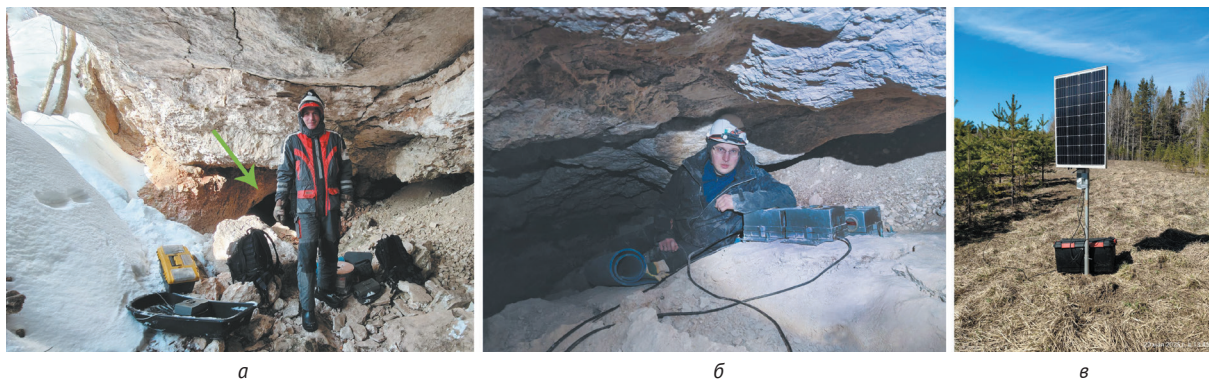


Рис. 4. Фотографии процесса установки сейсмических станций: а – процесс транспортировки аппаратуры, зеленой стрелкой показан вход в пещеру Водная (К-4), б – процесс установки сейсмических датчиков CM3-KB станции KLGR2 в пещере Водная (К-4), в – внешний вид места установки наземной сейсмической станций KLGR3

Fig. 4. Photos of the process of installing seismic stations: а – the process of transporting the equipment, the green arrow shows the entrance to Vodnaya Cave (K-4), б – the process of installation the CM3-KB seismic sensors of the KLGR2 station inside Vodnaya cave (K-4), в – exterior of the installation site of the KLGR3 ground seismic station

ниже 0,5 Гц для KLGR1, где его уровень повышается, но все же находится в допустимых пределах и не выходит за верхнюю границу модельной кривой Петерсона. Кроме этого, выделяются техногенные наводки в диапазоне выше 10 Гц, связанные с деятельностью промышленного и бытового оборудования различного назначения. Этот факт необходимо впоследствии учитывать при фильтрации сейсмических записей. Моменты установки оборудования и внешний вид станций показаны на рис. 4.

Следует отметить, что уровень микросейсм в данном районе даже несколько ниже, чем в других районах Архангельской области. Например, в районах установок сейсмических станций Андозеро (код ADZR, Онежский полуостров) и Лешуконское (код LSH, Мезенский район) на уровень микросейсмического фона большое влияние оказывают морские приливные эффекты и интенсивная хозяйственная деятельность.

Мы предполагаем, что ожидаемые сигналы, вызванные геодинамическими процессами в пещерах,

будут низкоамплитудными, иметь длительность до 10 с и периоды не больше 1 с.

Уже первые дни работы трех станций показали, что на сейсмических записях выделяются события различной природы — от сильных далеких (телесейсмических) землетрясений мира до близких локальных событий в виде микроимпульсов (примеры приведены на рис. 5а и 5б). На записях проявляются региональные арктические землетрясения, происходящие в системе Срединно-Арктического хребта Гаккеля (современной зоны спрединга). В пределах хребта Гаккеля установлено сложное напряженно-деформированное состояние земной коры [12], сопровождаемое тектонической и роевой вулкано-тектонической сейсмичностью [13; 14], не стоит исключать влияние этой сложной геодинамической системы на тектонику и геодинамику всей европейской Арктики и северной Евразии [15].

На всех записях временной системы мониторинга выявлены микросейсмические события длительностью в несколько секунд с амплитудами от 0,001



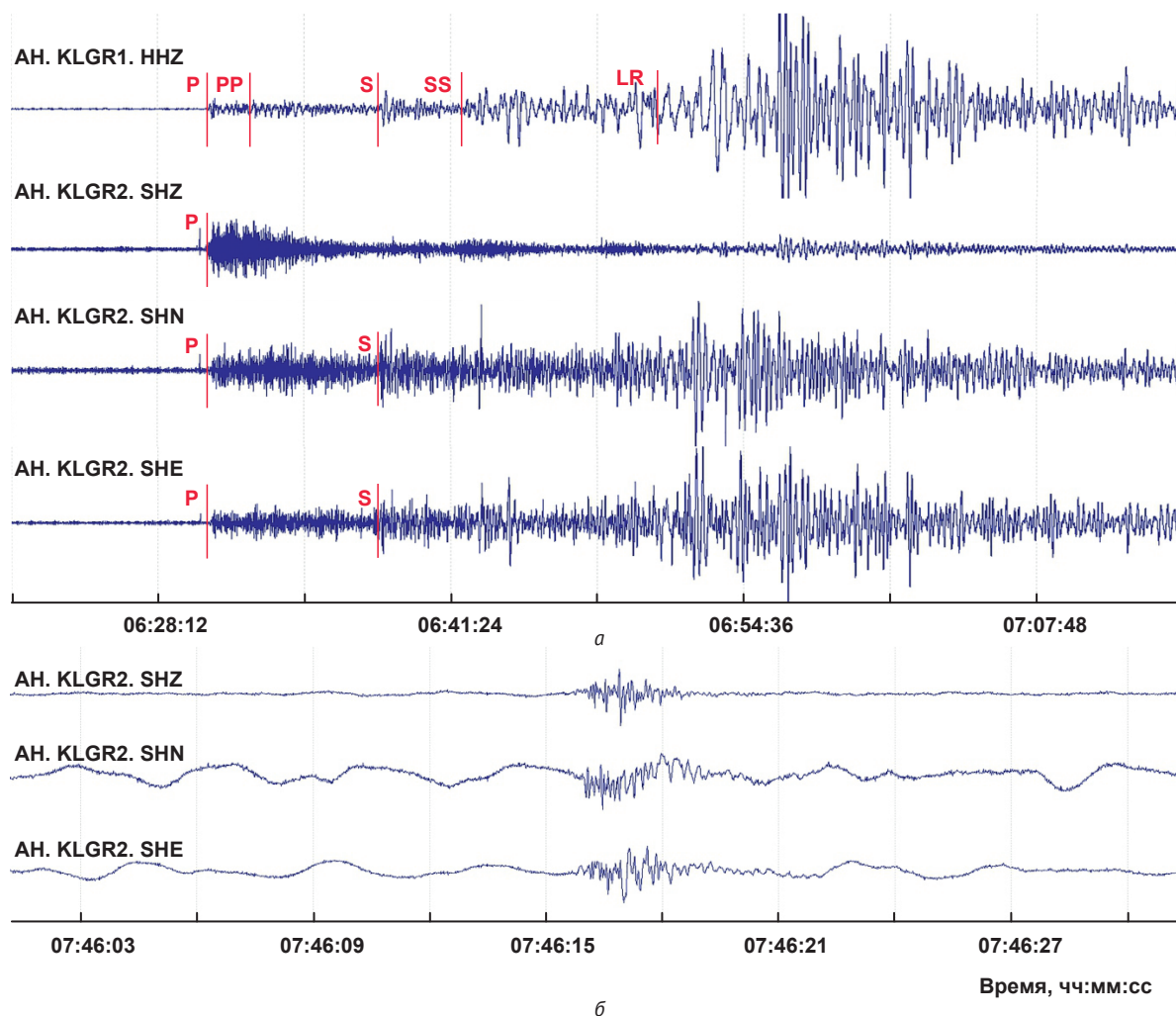


Рис. 5. Волновые формы сейсмических событий различного происхождения, зарегистрированные временной системой сейсмических наблюдений. Сейсмические станции: KLGR1 установлена на поверхности, KLGR2 — внутри пещеры; а — записи удаленного землетрясения в Мьянме 28.03.2025 ( $t_0 = 06:20:52$ ,  $M = 7,7$ ,  $h = 10$  км) с выставленными фазами P-, S- и поверхностных волн, б — записи микросейсмического события 06.04.2025 ( $t = 07:46:27$ )

Fig. 5. Waveforms of seismic events of different origins recorded by temporary seismic network. Seismic stations: KLGR1 is installed on the surface, KLGR2 — inside the cave; а — records of a remote earthquake in Myanmar on 28.03.2025 ( $t_0 = 06:20:52$ ,  $M = 7,7$ ,  $h = 10$  km) with marked phases of P, S and surface waves, б — records of a microseismic event on 06.04.2025 ( $t = 07:46:27$ )

до 0,1 мкм/с. Эти колебания могут быть связаны с естественными процессами, такими как движение подземных вод, и мелкими деформациями пород, поэтому важно внимательно изучить сейсмические записи во время сильных осадков и паводков. В такие периоды может наблюдаться увеличение количества микроимпульсов, что может предвещать обрушения. На следующем этапе исследований будет проведена типизация выделенных импульсов, выявлены их характерные «маски-образы», определены спектральные и энергетические параметры.

Анализ сейсмических данных первого этапа исследований подтверждает, что в районе Пинежского грабена постоянно происходят микросейсмические события. На основе имеющегося опыта можем предположить, что их природа связана с циркуляцией глубинных растворов в верхние отложения по

каналам трещин и разломов с нижних водоносных горизонтов, которые усиливают карстовые процессы.

### Обсуждение результатов

На территории Пинего-Кулойской зоны согласно отчету <sup>6</sup> и геологическим картам <sup>7</sup> выделены зоны

<sup>6</sup> Малков В. Н., Николаев Ю. И., Кузнецова В. А. Отчет по изучению экзогенных геологических процессов в бассейне р. Пинеги и на Беломорско-Кулойском плато / Архангельский ТГФ. — [Б. м.], 1983. — Инв. № 5838. — 401 с.

<sup>7</sup> Малков В. Н. Отчет по составлению геологических карт карстующихся пород масштаба 1:2 500 000 и 1:1 000 000 на территорию Архангельской области (Карстовый объект 1993–1994 гг.) / Архангельский ТГФ. — [Б. м.], 1994. — Инв. № 8092.

разрывов в карстовых массивах на коренных обнажениях и в верхних горизонтах осадочного чехла. Развитие пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя происходит в Средне-Пинежском грабене, который связан с тектоникой кристаллического фундамента. По результатам сейсморазведочных работ <sup>8</sup> тектонические нарушения, выявленные по данным глубинной сейсморазведки вблизи рассматриваемой пещерной системы, прослеживаются от рифейских грабенов в верхние горизонты осадочного чехла. По нашим результатам выявленные зоны трещиноватости могут быть следствием геодинамической активности глубинных тектонических нарушений.

Подобную зону нарушений можно проследить на временном разрезе профиля 1 на поперечных SH-волнах (см. рис. 2а). Четкое отслеживание чередования тонких слоев доломита, песка, гипса (пикет 150 м) сменяется зоной трещиноватости, прерыванием прослеживаемости горизонтов по разрезу. Сейсмическими критериями выделения карстовых полостей являются зоны потери корреляции горизонтов, появление дифрагированных волн. Отмечается повышенная степень нарушенности цельности массива начиная с пикета 170 м до завершения профиля-борта уступа. На схеме спелеологов пещера заканчивается пикетом 330 м (см. рис. 2а), но мы предполагаем, что зона развитого подземного карста продолжается до борта уступа. Есть предпосылки активного развития карстовых процессов на участке профиля 1.

На сейсмическом разрезе по профилю 2 (см. рис. 2б) наблюдается послойное чередование тонких слоев доломита, песка, гипса. В районе пикетов 72—86 м выделено проваливание блока, которое отражается потерей корреляции прослеживания горизонтов и смещением этой пачки горизонтов вниз. Следующий блок, в районе пикетов 88—98 м, также отрывается от общего прослеживания, дополняется пропаданием амплитуд на разрыве. Под нижним горизонтом, отмеченным желтым маркером, пропущенные амплитуды определяются как пустоты, предположительно связанные с пещерными ходами. В этой области на поверхности наблюдаются как старые, так и вновь образованные воронки, что отражено на схеме развития подземного карста (см. рис. 2б). К выявленным зонам разрывных нарушений профиля 2 (пикеты 74, 86 и 96 м) приурочены разуплотнения, что, согласно схеме пещер (см. рис. 1а), соответствует пещерному ходу. В 11 м от профиля 2 напротив пикетов 40—60 м образована большая карстовая воронка диаметром 25 м и глубиной 10 м, заросшая деревьями по бортам, которая на временном сейсмическом разрезе явно не проявля-

ется. Это говорит о том, что она не связана с пространством под линией профиля 2.

На рис. 2в—2г на разрезах профилей вынесены оси входов К-1 и К-2 в пещеру в ее основании и в пойме соответственно.

На профиле 5, расположенном в пойме, в верхней части разреза до 5 м озерно-ледниковые четвертичные отложения залегают без нарушений. Далее, напротив входов К-1 и К-2 (см. рис. 2г), наблюдается уменьшение амплитуд отраженных волн на 10 и 15 м, сопровождающееся отсутствием корреляции горизонта на 27 м и наклоном границы с глубины 40 м в северо-западном направлении. Просматривается малоамплитудное нарушение, которое связано с входом К-1 в пещеру. Возможно, отражение глубинных разломов в верхних горизонтах осадочного чехла связано с развитием рифейских отложений на провалах фундамента. Легкорастворимые в воде породы распространяются на глубину до 120 м, что позволяет предположить и возможность развития пещер Кулогорской системы на эти глубины. Ранее глубокие бездонные пещеры не фиксировались.

В пойме по линии профиля 4 (см. рис. 2д) на глубинах 2—5 м выделяется переход от рыхлых песков к плотным суглинкам. Далее под мощностью четвертичных наносов в горизонте доломита и сопутствующей его гипсово-ангидритовой толще со 100 мс (20—25 м) обнаружены зоны разуплотнения на разных глубинах и малоамплитудные нарушения.

В районе пикетов 410—458 м (см. рис. 2д) выделяется аномалия (искривленная ось синфазности). Предполагаем, что на глубинах около 30 м наблюдается прогиб по типу воронки, где повышенная трещиноватость способствует стоку подземных вод и образованию канала на глубинах от 40 до 55 м. По результатам обработки профиля 4 (см. рис. 2д) обнаружены зоны нарушений в горизонтальной плоскости разреза на глубинах в районе пикетов: 24 м, 92 м, 116 м, 190 м, 290 м, 242 м, 314 м, 362 м, 410 м, 458 м, 694 м.

Таким образом, методика высокоразрешающей сейсморазведки на SH-волнах позволяет в волновом поле фиксировать зоны трещиноватости и выявлять карстовые полости.

Применение сейсмических критериев поиска карстовых и погребенных воронок дополнится степенью развития карстовых процессов по результатам сейсмического мониторинга. Уже начаты расчеты напряженно-деформированного состояния, и можно отметить низкие скорости поперечных волн в карбонатных породах, что является показателем разуплотнения и, возможно, будущего провала.

В качестве признаков выделения карстовых процессов можно отметить следующее: наличие зон разуплотнения пород, выраженных слабыми амплитудами волн, зон потери корреляции прослеживаемости отраженных волн от горизонтов в карстовых породах, зон трещиноватости со смещением го-

<sup>8</sup> Ермолаева Г. М. Сейсморазведочные работы. Мезенская синеклиза (профиль I-I): Информационный отчет. Инв. № 8996 / Архангельский филиал ФБУ «ТФГИ по СЗФО». — Архангельск, 2002. — 270 с.



ризонтов, иногда наблюдаются опущенные блоки. Все перечисленные признаки коррелируют с местами обрушений — карстовыми воронками на поверхности, в нашем случае пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя.

### Выводы

Исследования продемонстрировали возможности использования методики высокоразрешающей сейсморазведки на SH-волнах для выявления ослабленных зон в карстовых массивах Пинежского района. Степень карстового развития в данном районе очень высока, что отражается в рельефе множеством воронок и прогибов. Полученные результаты показали возможность идентифицировать аномалии отраженных поперечных волн с наличием карстовых полостей и зон трещиноватости.

Для выделения геодинамически активных зон пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя установлена временная система сейсмического мониторинга. Первые результаты зарегистрированных событий различной природы показывают высокую чувствительность сейсмической системы. Сейсмический мониторинг геодинамических процессов позволит выявить изменения в напряженно-деформированном состоянии карстовых пещер, помочь в выявлении потенциальных источников и прогнозе проявлений опасных геологических процессов, таких как обрушение.

Начатые работы не только способствуют развитию научных представлений о геодинамике региона, но и имеют практическое применение для обеспечения безопасности как туристов, так и жителей расположенной рядом деревни Кулогоры, и для сохранения природных объектов. Дальнейшие работы в этом направлении позволят понять геологические процессы в природе уникальных карстовых систем поморского Севера.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, проект № 125021702395-9.

### Благодарность

Авторы признательны коллегам из спелеологической организации АСА «Лабиринт», оказавшим поддержку в проведении исследований, и лично Н. А. Францу за консультации и предоставленные материалы.

### Литература/References

1. Малков В. Н., Гуркало Е. И., Монахова Л. Б. и др. Карст и пещеры Пинежья. — М.: Ассоциация «ЭКОСТ», 2001. — 208 с.  
Malkov V. N., Gurkalo E. I., Monakhova L. B., Shavrina E. V., Gurkalo V. A., Franz N. A. Karst and caves of Pinezh'e. Moscow, Association "EKOST", 2001, 208 p. (In Russian).

2. Шаврина Е. В. Современное развитие подземного и поверхностного карста юго-востока Беломорско-Кулойского плато // Вopr. географии. — 2018. — № 147. — С. 88—106.  
Shavrina E. V. Modern development of underground and surface karst in the southeast of the Belomorsko-Kuloiskoe plateau. Voprosy geografii, 2018, no. 147, pp. 88—106. (In Russian).

3. Xeidakis G. S., Torok A., Skias S., Kleb B. Engineering geological problems associated with karst terrains: Their investigation, monitoring, and mitigation and design of engineering structures on karst terrains. Bull. Geol. Soc. Greece, 2004, vol. 36, pp. 1932—1941. DOI: 10.12681/bgsg.16679.

4. Худеньких К. О. Мониторинг развития карстовых процессов при разработке месторождений строительного гипса // Изв. УГГУ. — 2021. — Вып. 4 (64). — С. 116—129. — DOI: 10.21440/2307-2091-2021-4-116-129.  
Khudenkikh K. O. Monitoring the development of karst processes during the development of building gypsum deposits. Bull. of UGMU, 2021, iss. 4 (64), pp. 116—129. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-4-116-129. (In Russian).

5. Воронков О. К., Акатов Ю. Е. Сейсморазведочные исследования на карсте // Геология и геофизика. — 1967. — Т. 8, № 6. — С. 98—105.  
Voronkov O. K., Akatov Yu. E. Seismic exploration studies on karst. Geology and Geophysics, 1967, vol. 8, no. 6, pp. 98—105. (In Russian).

6. Жуков А. А., Пригара А. М., Пушкарева И. Ю., Царев Р. И. Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников // Гор. информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). — 2015. — № 5. — С. 120—130.  
Zhukov A. A., Prigara A. M., Pushkareva I. Yu., Tsarev R. I. Experience of using a set of geophysical methods to identify karst cavities in potash mine dumps. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2015, no. 5, pp. 120—130. (In Russian).

7. Бондарев В. И. Основы сейсморазведки: Учеб. для вузов. — Екатеринбург: УГГА, 2003. — 332 с.  
Bondarev V. I. Fundamentals of seismic exploration: textbook for universities. Ekaterinburg, UGGA, 2003, 332 p. (In Russian).

8. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Полякова Е. В. Расчет плотности гидросети равнинных арктических и субарктических территорий России по цифровой модели рельефа с использованием ГИС-технологий (на примере Архангельской области) // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 511—521. — DOI: 10.25283/2223459420244511521.  
Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Polyakova E. V. Calculation of the density of the hydraulic network of the flat Arctic and subarctic territories of Russia using a digital relief model using GIS technologies (using the example of the Arkhangelsk region). Arctic: Ecol-

- ogy and Economy, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 511—521. DOI: 10.25283/2223459420244511521. (In Russian).
9. Тихонов А. А. Многоволновая сейсморастворка: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 2008.
- Tikhonov A. A. Multiwave seismic exploration: textbook. Moscow, Moscow State University Publishing House, 2008. (In Russian).
10. Басакина И. М., Антоновская Г. Н., Игнатчик Е. М. Сейсмические исследования тектонического нарушения в зоне сочленения Кандакшско-Двинского рифта с Архангельским выступом // Вестн. геонаук. — 2022. — № 2 (326). — С. 12—18. — DOI: 10.19110/geov.2022.2.2.
- Basakina I. M., Antonovskaya G. N., Ignatchik E. M. Seismic studies of a tectonic fault in the junction zone of the Kandalaksha-Dvina rift with the Arkhangelsk ledge. Herald of Geosciences, 2022, no. 2 (326), pp. 12—18. (In Russian).
11. Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey, 1993, 95 p. DOI: 10.3133/ofr93322.
12. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Беленович Т. Я., Морозов А. Н. Современная геодинамика хребта Гаккеля по сейсмологическим данным // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 4. — С. 58—71.
- Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Belenovich T. Ya., Morozov A. N. Modern geodynamics of the Gakkel Ridge based on seismological data. Arctic: Ecology and Economy, 2016, no. 4, pp. 58—71. (In Russian).
13. Morozov A. N., Vaganova N. V., Ivanova E. V., Konechnaya Y. V., Fedorenko I. V., Mikhaylova Y. A. New data about small-magnitude earthquakes of the ultraslow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean. J. of Geodynamics, 2016, vol. 93, pp. 31—41. DOI: 10.1016/j.jog.2015.11.002.
14. Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Михайлова Я. А. и др. Рои землетрясений как свидетельство вулканотектонических процессов на ультрамедленном спрединговом хребте Гаккеля в Арктике // Геодинамика и тектонофизика. — 2024. — Т. 15, № 1. — Гл. 0737. — DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0737.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Mikhailova Ya. A., Morozova E. R., Starkov I. V. Earthquake swarms as evidence of volcano-tectonic processes of the slowest spreading Gakkel Ridge in the Arctic. Geodynamics & Tectonophysics, 2024, vol. 15, iss. 1, article 0737. DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0737. (In Russian).
15. Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., Kapustian N. K., Konechnaya Y. V., Morozov A. N. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic. Seismological Research Letters, 2021, vol. 92, no. 5, pp. 2876—2890. DOI: 10.1785/0220210024.

## Информация об авторах

**Антоновская Галина Николаевна**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: antonovskaya@fciarctic.ru.

**Басакина Ирина Михайловна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: ibasakina@yandex.ru.

**Ваганова Наталья Владиславовна**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: nvag@yandex.ru.

**Царев Андрей Михайлович**, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20); научный сотрудник, Институт криосферы Земли — обособленное структурное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра СО РАН (625026, Россия, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), e-mail: tsarev.am@gmail.com.

## SEISMIC SURVEYS OF KARST CAVES IN THE ARCTIC: FIRST RESULTS

Antonovskaya, G. N.<sup>1</sup>, Basakina, I. M.<sup>1</sup>, Vaganova, N. V.<sup>1</sup>, Tsarev, A. M.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russian Federation)

<sup>2</sup> Institute of the Earth Cryosphere — a separate structural division of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Federal Research Center of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tyumen, Russian Federation)

The article was received on July 2, 2025

### For citing

Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., Tsarev A. M. Seismic surveys of karst caves in the Arctic: first results. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 508—518. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-508-518. (In Russian).

### Abstract

The paper presents the first results of seismic survey of the Kulogorskaya-Vodnaya-Troya cave system located in the Pinezhsky district of the Arkhangelsk Region, classified as the Arctic zone of the Russian Federation. The results of processing high-resolution seismic exploration data using SH waves made it possible to establish signs for identification of karst cavities and fracture zones. A temporary seismic monitoring network has been installed in the area of the cave system to study the dynamics of the formation and development of karst processes. The first results of recording seismic events of various types confirm its high sensitivity.

**Keywords:** karst processes, seismic exploration using the common depth point (CDP) method, transverse SH-waves, temporary seismic network.

### Funding

The research was carried out within the framework of the state assignment of the FECIAR UrB RAS, project № 125021702395-9.

### Acknowledgements

The authors would like to thank their colleagues from the speleological agency ASA “Labyrinth”, who provided support in conducting the research, and personally N. A. Frantz for consultations and provided materials.

### Information about the authors

**Antonovskaya, Galina Nikolaevna**, Doctor of Engineering Science, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: antonovskaya@fciarctic.ru.

**Basakina, Irina Mikhailovna**, PhD of Engineering Science, Senior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: ibasakina@yandex.ru.

**Vaganova, Natalya Vladislavovna**, PhD of Geological and Mineralogical Science, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: nvag@yandex.ru.

**Tsarev, Andrey Mikhailovich**, Research Associate, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020); Research Associate, Institute of the Earth Cryosphere — a separate structural division of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Federal Research Center of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026), e-mail: tsarev.am@gmail.com.

© Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., Tsarev A. M., 2025