

УДК 550.83:551.435.4

DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

Оригинальная статья

## Локализация скрытых зон развития опасных геологических процессов в прибрежном клифе городища «Херсонес Таврический» с помощью методов инженерной геофизики

В.В. Глазунов<sup>1,3</sup>, Д.И. Зеликман<sup>1</sup>, Н.Н. Ефимова<sup>2</sup>, А.А. Букатов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: s235005@stud.spmi.ru;

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний пр., 74, e-mail: natafima@mail.ru;

<sup>3</sup> Государственный историко-археологический музей-заповедник «Херсонес Таврический», Россия, 299045, г. Севастополь, ул. Древняя, 1, e-mail: bukat@list.ru

Статья поступила: 05.03.2026, доработана: 11.06.2026, принята к публикации: 16.06.2026

**Резюме: Актуальность работы.** Прибрежные клифы территории городища «Херсонес Таврический» подвержены развитию опасных геологических процессов, приводящих к деградации береговой линии и угрозе сохранности объектов культурно-исторического наследия. Для обоснования мер защиты побережья требуется получение детальной инженерно-геологической информации о строении и состоянии скального массива, а также локализация ослабленных зон, влияющих на устойчивость клифа. Сложные условия объекта исследования, которым является массив берегового клифа, обуславливают необходимость применения комплекса геофизических методов на основе технологии 3D сейсмотомографического прозвучивания. **Целью исследования** является локализация скрытых ослабленных зон в объеме скального массива прибрежного клифа городища «Херсонес Таврический», определяющих развитие опасных геологических процессов. Выполненные комплексные инженерно-геофизические наблюдения включали следующие **методы исследования**: георадиолокационное зондирование, бесконтактную электротомографию и инновационный метод 3D сейсмотомографического прозвучивания. Выполнена инверсия полученных данных и построены карты-срезы и 3D-модели распределения электрического сопротивления и скоростей распространения Р- и S-волн, а также динамических модулей упругости. **Результаты.** По результатам комплексной интерпретации геофизических данных локализованы ослабленные зоны, приуроченные к нарушению бронирующего слоя известняков и развитию трещин отрыва. Установлено пространственное совпадение аномалий, выделенных по данным электротомографии, георадиолокации и сейсмотомографии. Наиболее опасные участки характеризуются пониженными значениями скоростей Р- и S-волн и снижением динамических модулей упругости, что представляет угрозу устойчивости клифа и расположенных вблизи него сооружений. Показана высокая эффективность методики СТП 3D для исследования береговых клифов и оценки факторов, определяющих их устойчивость.

**Ключевые слова:** сейсмотомография, сейсмическое прозвучивание, 3D-инверсия, электротомография, георадиолокация, устойчивость берегового клифа, побережье Крыма.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-01964, <https://rscf.ru/project/25-28-01964/>.

**Для цитирования:** Глазунов В.В., Зеликман Д.И., Ефимова Н.Н., Букатов А.А. Локализация скрытых зон развития опасных геологических процессов в прибрежном клифе городища «Херсонес Таврический» с помощью методов инженерной геофизики. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 32–44. DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

---

---

GEOPHYSICS

---

---

DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

Original paper

## Localization of hidden zones of hazardous geological process development in the coastal cliff of the Chersonesos Taurica Ancient settlement using engineering geophysics methods

V.V. Glazunov<sup>1, 3</sup>, D.I. Zelikman<sup>1</sup>, N.N. Efimova<sup>2</sup>, A.A. Bukatov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line Vasilyevsky Ostrov, Saint-Petersburg 199106, Russian Federation, e-mail: s235005@stud.spmi.ru;

<sup>2</sup> A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74 Sredny Pr., Saint-Petersburg 199106, Russian Federation, e-mail: natafima@mail.ru;

<sup>3</sup> The State Museum-Preserve “Tauric Chersonese”, 1 Drevnaya Str., Sevastopol 299045, Russian Federation, e-mail: bukat@list.ru

Received: 05.03.2026, revised: 11.06.2026, accepted: 16.06.2026

**Abstract. Relevance.** The coastal cliffs of the Chersonesos Taurica ancient settlement are subject to the development of hazardous geological processes, leading to coastal degradation and posing a threat to the preservation of cultural and historical heritage sites. Substantiation of coastal protection measures requires detailed engineering-geological information on the structure and condition of the rocky massif, as well as localization of weakened zones affecting cliff stability. The complex conditions of the study object, represented by a coastal cliff rock massif, determine the necessity of applying a set of geophysical methods based on 3D seismic tomographic sounding technology. **The aim** of the study is to localize concealed weakened zones within the rock massif of the coastal cliff of the Chersonesos Taurica ancient settlement that control the development of hazardous geological processes. The conducted integrated engineering-geophysical surveys included the **research methods:** ground-penetrating radar sounding, non-contact electrical resistivity tomography, and the innovative method of 3D seismic tomographic sounding. The acquired data were inverted, and depth slices and 3D models of electrical resistivity distribution, P- and S-wave velocities, and dynamic elastic moduli were constructed. **Results.** Based on the integrated interpretation of geophysical data, weakened zones associated with disruption of the limestone armoring layer and the development of detachment cracks were localized. A spatial correspondence of anomalies identified by electrical resistivity tomography, ground-penetrating radar, and seismic tomography was established. The most hazardous areas are characterized by reduced P- and S-wave velocities and decreased dynamic elastic moduli, posing a threat to cliff stability and nearby structures. The high efficiency of the STP 3D methodology for investigating coastal cliffs and assessing the factors controlling their stability is demonstrated.

**Keywords:** seismic tomography; seismic sounding; 3D inversion; electrical resistivity tomography (ERT); ground-penetrating radar (GPR); coastal cliff stability; Crimean coast.

**Acknowledgements:** *The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-28-01964, <https://rscf.ru/project/25-28-01964/>.*

**For citation:** Glazunov V.V., Zelikman D.I., Efimova N.N., Bukatov A.A. Localization of hidden zones of hazardous geological process development in the coastal cliff of the Chersonesos Taurica Ancient settlement using engineering geophysics methods. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 32–44. DOI: 10.46698/VNC.2026.51.92.001

## Введение

Клифы прибрежной территории городища «Херсонес Таврический» подвержены влиянию опасных геологических процессов, приводящих к утрате объектов культурно-исторического наследия. Для оценки их состояния и проведения защитных мероприятий необходима комплексная инженерно-геологическая информация о строении и физико-механических свойствах скального массива, а также о факторах, определяющих деградацию береговой линии [Marciniak et al., 2021; Sujitapan et al., 2024; Odintsov, Gusev, 2026].

Слоистое строение массива, представленного известняками и глинами различной плотности, пористости и степени трещиноватости, а также неравномерное распределение влажности в слоях известняков, связанное с инфильтрацией атмосферных осадков, обуславливает необходимость применения комплекса методов инженерной геофизики.

Ранее была предложена и апробирована методика 3D сейсмотомографического прозвучивания, предназначенная для объёмной локализации зон пониженных скоростей Р- и S-волн и связанных с ними изменений динамических модулей упругости [Глазунов и др., 2025]. Однако решение прикладной инженерно-геологической задачи – выявление скрытых зон деструкции в специфических условиях берегового клифа – требует привлечения дополнительных независимых геофизических признаков [Шабаров, Куранов, 2023].

Настоящая статья развивает этот подход за счёт комплексной интерпретации данных георадиолокационного зондирования, бесконтактной электротомографии и 3D сейсмотомографического прозвучивания, выполненных по единой сети наблюдений. Комплексная геолого-геофизическая интерпретация на основе построения цифровых моделей широко применяется для уточнения строения и выявления неоднородностей геологической среды [Nefedov et al., 2023; Бабенко и др., 2025; Nosov et al., 2022].

Такое комплексирование позволяет повысить достоверность выделения скрытых зон деструкции за счёт взаимного подтверждения аномалий в различных физических полях [Егоров и др., 2025; Трушко и др., 2024]. Существенную роль в формировании неоднородностей могут играть разрывные нарушения и связанные с ними зоны повышенной трещиноватости и проницаемости, что необходимо учитывать при интерпретации результатов комплексных исследований [Данильев и др., 2024а; Данильев и др., 2024б; Glazunov et al., 2026].

## Характеристика объекта исследований

В качестве объекта комплексных геофизических исследований был выбран участок клифа северного побережья городища «Херсонес Таврический», подверженный активной деградации (рис. 1).

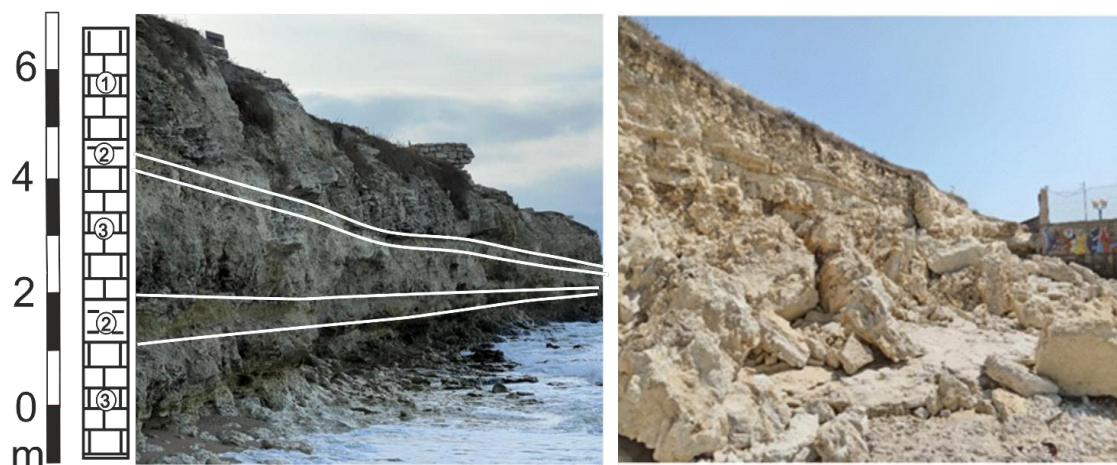


Рис. 1. Стратифицированный геологический разрез абразионного клифа и последствия обрушения в мае 2023 г. Условные обозначения: 1 – известняк скальный; 2 – глина набухающая; 3 – известняк полускальный; белые линии соответствуют литологическим границам [материалы авторов] /

Fig. 1. Stratified geological cross-section of an abrasion cliff and the consequences of the May 2023 collapse. Legend: 1 – rock limestone; 2 – clay; 3 – semi-rock limestone; white lines indicate lithological boundaries [authors' materials]

Геологическое строение клифа сформировано верхнемиоценовыми отложениями, которые представлены породами сарматского яруса среднего горизонта. Толща горных пород сложена в основном хемогенно-органогенными и частично перекристаллизованными известняками с прослоями глин. В слоистой толще, слагающей клиф, наблюдаются трещины и зоны трещиноватости, вероятно, связанные с тектоническими нарушениями (рис. 1).

Глинистые отложения наименее устойчивы к выветриванию, поэтому вдоль них формируются продольные волноприбойные ниши [Ustiugov et al., 2025; Chellamuthu et al., 2026]. Плато, прилегающее к береговому обрыву, сформировано полускальными известняками. Слой этих прочных известняков бронирует скальный массив, надежно защищая его от разрушения [Горячкин, Долотов, 2019].

Ранее оценка состояния клифа в основном опиралась на визуальные наблюдения, что не позволяло выявлять скрытые деформационные изменения в объеме массива. Как отмечается в ряде работ, при оценке оползневой опасности отсутствие информации о внутреннем состоянии массива существенно снижает достоверность прогноза развития деструктивных процессов [Поспехов, Савон-Васиано Юсмира, 2024; Афанасьев и др., 2024].

Факторы деструкции массива можно разделить на три группы: геолого-геоморфологические условия; периодические экзогенные воздействия, включая инфильтрацию осадков и прибойную динамику; быстро развивающиеся процессы, связанные с раскрытием трещин отрыва и обвальным разрушением [Ефремова, Горячкин, 2023; Жерлыгина и др., 2025; Ревазов и др., 2026].

Последние значительные обрушения клифа херсонесского городища произошли около оборонительной Башни 1 Херсонеса в мае 2023 г. (рис. 1). Необходимо отметить, что этот аварийный клиф находится на значительном удалении от уреза воды, то есть обвалы не являются следствием волноприбойной нагрузки.

Дополнительной причиной обвала явилось негативное антропогенное воздействие на скальный массив. В районе плато, прилегающем к башне, бронирующий слой известняка, формирующий его поверхность, был разрушен в античное время. Нарушение слоя прочных известняков привело к интенсификации процесса химической абразии нижерасположенных полускальных пород.

Таким образом, для полноценной оценки аварийного состояния скального массива, наряду с визуальным обследованием поверхности клифа, необходимо получить дополнительную информацию о проявлениях скрытых деструктивных процессов, развивающихся в объеме скального массива.

### Методы исследований

Для решения поставленных геологических задач в районе Уваровской базилики были выполнены геофизические съемки методами георадиолокационного зондирования (ГРЛЗ), бесконтактной электротомографии (БЭТ) и сейсмотомографического прозвучивания 3D (СТП 3D) по единой регулярной сети наблюдений (рис. 2).

Профили геофизических съемок проложены параллельно продольным стенам базилики через 2 м. Корректность задания геометрии наблюдений и точность привязки пунктов наблюдения имеют принципиальное значение при проведении сейсморазведочных наблюдений [Hellmann et al., 2023]. Топографическая привязка сети осуществлялась с помощью тахеометра Leica MS-50, методом выноса реперов базовых точек городища в зону проведения работ.

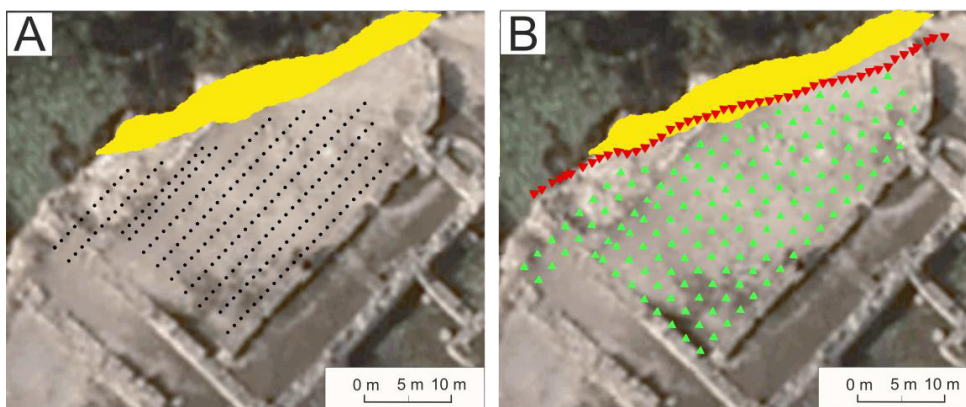


Рис. 2. Сеть электроразведочных (А) и сейсмических (В) наблюдений. Условные обозначения: 1 – обрушившийся участок клифа в период 2002–2021 гг.; 2 – точки наблюдения БЭТ; 3 – сейсμοприемники; 4 – пункты возбуждения сейсмических волн [материалы авторов] /

Fig. 2. Electrical survey (a) and seismic survey (b) observation networks. Legend: 1 – cliff section that collapsed during the period from 2002 to 2021; 2 – NERT observation points; 3 – seismic receivers; 4 – seismic source points [authors' materials]

**Георадарная съемка.** В рамках комплексного обследования клифа данные георадиолокационной съемки рассматриваются как вспомогательный источник для картирования приповерхностной трещиноватости и уточнения геометрии разуплотнённых зон. Тем не менее эффективность метода для решения поставленных задач подтверждается результатами физического моделирования и численного анализа откликов трещин в ГРЛ [Song et al., 2025; Li et al., 2024].

Исследования проведены на участке, примыкающем к обрыву, по серии профилей с расстоянием 1 м. Методика георадарной съемки обеспечила получение непрерывных георадиолокационных разрезов вдоль профилей. Глубина зондирования на поверхности скальных пород на центральных частотах 300 и 500 МГц не превышала 5 м, а на участках, перекрытых слоем суглинков культурного слоя, – 2 м.

**Бесконтактная электротомографическая съемка.** Возможности применения бесконтактных (неразрушающих) электроразведочных методов постоянного тока для исследования приповерхностной структуры горного массива, в том числе в условиях ограниченного доступа, сложного рельефа и экранированных поверхностей, показаны в ряде работ [Jeong, Nam, 2024].

Электроразведка методом БЭТ позволяет с требуемой степенью детальности изучить слоистость геолого-литологического разреза клифа и обеспечить локализацию известняков различного состава, степени пористости и влажности, а также пропластков глин. Метод обеспечивает картирование зон трещиноватости, в том числе связанных с тектоническими нарушениями массива скальных пород. Однако остатки стен существенно затрудняют выполнение наблюдений этим методом, так как их наличие не позволяет расположить измерительные диполи требуемым образом. Полезным преимуществом этого метода является возможность выполнения съемки на поверхности скальных пород.

Съемка выполнена по 11-ти профилям с шагом наблюдений 1 м. Длина профилей с ПР12 по ПР19, расположенных вблизи уступа, ограничивалась контуром клифа (рис. 3,а). Количество точек наблюдения определялось длиной профиля и размерами измерительной установки.

**3D сейсмотомографическое прозвучивание.** Современные методы исследования степени деструкции массивов горных пород основаны на использовании активных сейсмических воздействий и анализе параметров распространения упругих волн, в том числе в рамках скважинных, межскважинных и объемных сейсмоакустических исследований, эффективность которых подтверждена в публикациях [Дорохин, 2019].

Сейсмотомографическое объемное прозвучивание скального массива, расположенного в интервале между поверхностью плато и линией волноприбойной ниши клифа, выполнено на основе регистрации проходящих продольных и поперечных сейсмических волн. Сеть сейсмических пунктов возбуждения (ПВ) и приема (ПП) сейсмических волн размещалась на разных высотных уровнях. Пункты ПВ сейсмических волн располагались сверху, на площади Уваровской базилики, а сейсмоприемники ПП – внизу, вдоль основания клифа с шагом 1 м (рис. 2,В).

### Результаты исследований

Результаты комплексных геофизических исследований представлены в виде геофизических карт и разрезов, характеризующих пространственное распределение физических свойств в объеме массива горных пород. На картах и разрезах определено положение ослабленных зон и выделены наиболее опасные для устойчивости клифа участки.

#### Результаты электротомографических исследований методом БЭТ

На электротомографических разрезах проявились слоистая структура геологического разреза и ослабленные зоны в слое известняков (рис. 3).

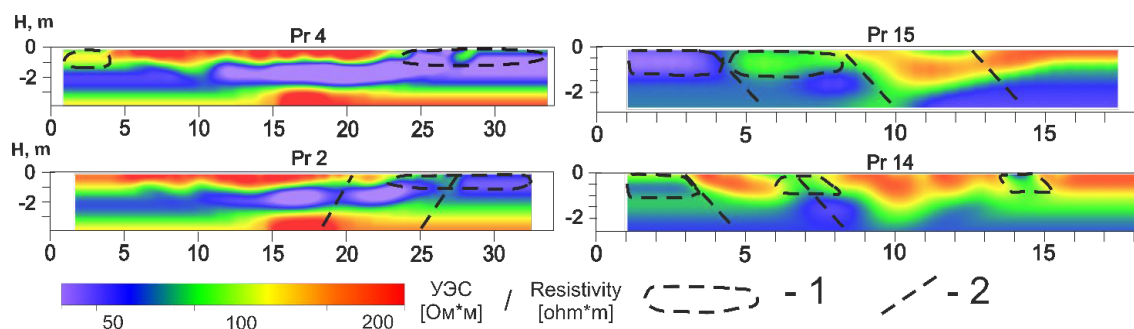


Рис. 3. Характерные электротомографические разрезы по крайевым профилям, расположенным вдоль края обрыва. Условные обозначения: 1 – значительные нарушения слоя; 2 – трещины и зоны трещиноватости [материалы авторов] /

Fig. 3. Representative electrical resistivity tomography (ERT) sections along peripheral profiles, located along the cliff edge. Legend: 1 – significant disturbances in the layer; 2 – cracks and fractured zones [authors' materials]

Высокоомные области на разрезах, окрашенные в красно-желтую цветовую гамму, свойственны слою прочных известняков. Низкоомный слой на разрезах соответствует влажным кавернозным известнякам и глинам (рис. 3). Нарушение верхнего слоя приводит к формированию ослабленных зон в известняковом массиве клифа, по которым происходит инфильтрация атмосферных осадков. На геоэлектрических разрезах вдоль профилей, проложенных на расстоянии 2–5 м от края обрыва, отчетливо проявились локальные зоны, связанные с нарушениями бронирующего слоя известняков (рис. 3). Эти нарушения представляют наибольшую опасность, так как связаны с образованием трещин отрыва, которые могут приводить к обвалам и разрушению клифа.

На электротомографических картах зоны локальных нарушений проявляются в виде локальных и линейно вытянутых аномалий пониженных значений удельных электрических сопротивлений (УЭС) (рис. 4). На карте, линейно вытянутые аномалии контролируют положение формирующихся трещин отрыва, которые выделены пунктирными линиями. Области нарушений слоя глинистых известняков заштрихованы.

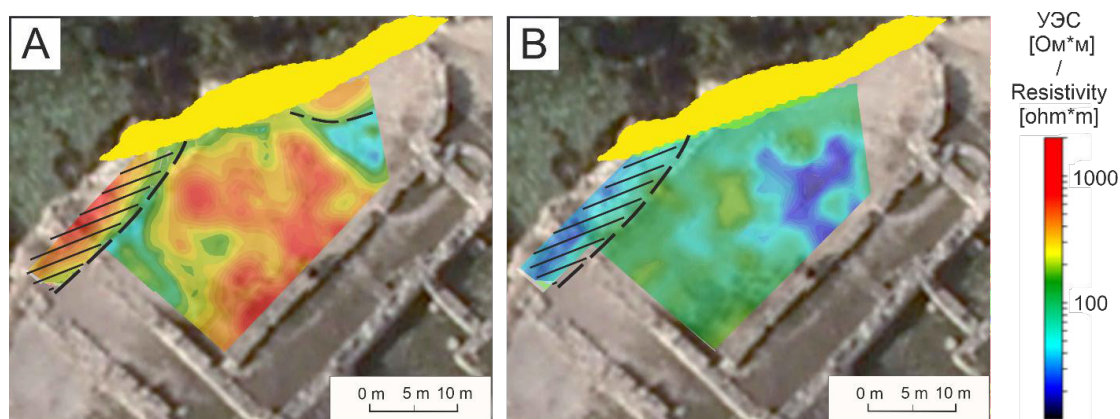


Рис. 4. Локализация формирующейся трещины отрыва (штрихпунктирная линия) и зоны ослабленных скальных известняков (показаны штриховкой) ИГЭ 4 на геоэлектрических картах-срезах глубин 0,5 м (А) и 1,8 м (В) [материалы авторов] /

Fig. 4. Localization of the developing tension crack (dashed line) and the zone of weakened limestone rocks (EGE 4) on geoelectrical depth-slice maps at depths of 0.5 m (A) and 1.8 m (B) [authors' materials]

Материалы, полученные методом БЭТ, позволили локализовать наиболее аварийный участок в пределах Уваровской базилики, на котором в ближайшие годы можно ожидать обвалы клифа (рис. 7).

### **Результаты георадиолокационных исследований методом ГРЛЗ**

В результате анализа динамических и кинематических особенностей волнового электромагнитного поля на георадиолокационных разрезах указаны приповерхностные слои и ослабленные зоны (рис. 5). Границы на разрезах контролируются субгоризонтальными осями синфазности отраженных электромагнитных волн, а зоны деструкции проявляются в виде интенсивных возмущений волнового поля, оконтуренных на разрезе желтой пунктирной линией (рис. 5).

Совместный анализ геоэлектрических и георадиолокационных разрезов показывает, что положение ослабленных зон на электротомографических и георадиолокационных разрезах практически совпадают. Таким образом, данные георадиолокации подтверждают и уточняют выводы, сделанные по данным БЭТ, о локализации сформировавшихся в приповерхностных слоях известняка трещин и зон трещиноватости, угрожающих устойчивости клифа.

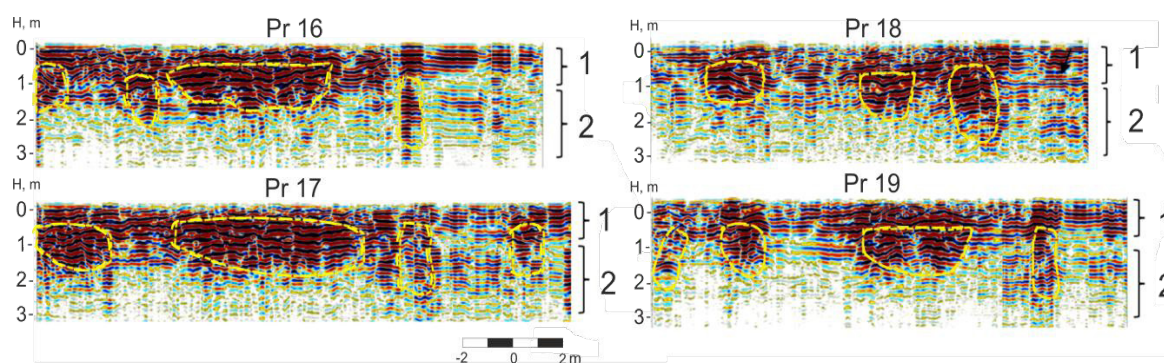


Рис. 5. Георадиолокационные разрезы по профилям Пр16–Пр19 с указанием слоев известняка (1 – бронирующий слой известняков, 2 – известняки малопрочные) и ослабленных, трещиноватых зон массива известняков [материалы авторов] /

Fig. 5. Ground-penetrating radar sections along profiles Pr16–Pr19, indicating limestone layers (1 – protective limestone layer; 2 – low-strength limestone) and weakened, fractured zones within the limestone massif [authors' materials]

### Результаты сейсмотомографических исследований методом СТП 3D

По результатам цифровой обработки данных сейсмотомографического прозвучивания с помощью программы “ZondST3d” (ООО «Геодевайс») рассчитаны траектории распространения лучей первых вступлений Р- и S-волн, а также синтезированы цифровые 3D-модели распределения скоростей  $V_p$  и  $V_s$  в объеме скального массива. В качестве примера на рисунке 6 представлены 3D-модель распределения скоростей продольных сейсмических волн и соответствующие траектории распространения лучей первых вступлений Р-волн.

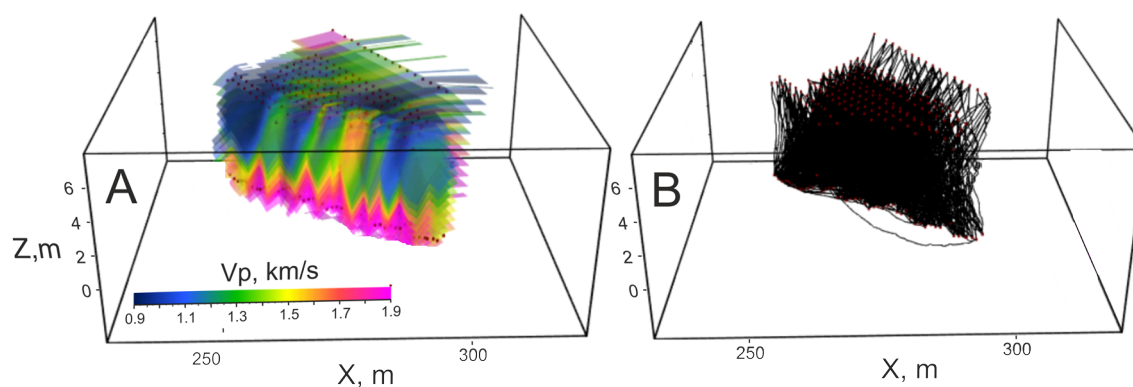


Рис. 6. Синтезированные 3D-модель распределения значений скоростей сейсмических волн  $V_p$  в скальном массиве (а) и траектории распространения лучей первых вступлений (б) по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания [материалы авторов] /

Fig. 6. 3D model of the distribution of P-wave seismic velocity ( $V_p$ ) values in the rock mass and first-arrival ray propagation paths synthesized from 3D seismic tomographic sounding data. [authors' materials]

В областях, примыкающих к клифу, образование ослабленных зон связано с воздействием совокупности процессов выветривания. Кроме того, в этих зонах, видимо, активно развивается трещиноватость и начинают формироваться трещины отрыва.

Возможность использования сейсмических методов для изучения состояния массива базируется на взаимосвязи скоростей распространения упругих волн в среде с динамическими модулями Юнга  $E_d$  и  $E_{деф}$ , которые характеризуют прочностные свойства горных пород [Lu et al., 2025].

Для расчета модулей использовались величины скоростей Р- и S-волн, вычисленные по данным **СТП 3D**, а также значения плотности пород, определенные по данным бурения скважин на соседнем участке. Необходимо отметить, что значения  $E_{\text{деф}}$ , вычисленные по данным сейсмотомографии являются полуколичественными.

Карта-срез, характеризующая распределение модуля общей деформации  $E_{\text{деф}}$  для абсолютной отметки 4 м, дает представление об изменениях прочностных свойств известняков верхней части геологического разреза в пределах Уваровской базилики (рис. 7).

На карте-срезе, совмещенной с ортофотопланом территории Уваровской базилики, красной пунктирной линией оконтурены участки, характеризующиеся наиболее низкими значениями  $E_{\text{деф}}$ . Эти зоны соответствуют ослабленным, наиболее опасным участкам скального массива, расположенным вблизи клифа.

Пунктирная синяя линия характеризует размещение ослабленных зон поверхностного слоя, представленного скальными известняками (рис. 7). Локальные изометрические зоны обусловлены, видимо, антропогенными нарушениями бронирующего слоя, а линейно-вытянутые – воздействием тектонических нарушений, визуально наблюдаемых на поверхности клифа.

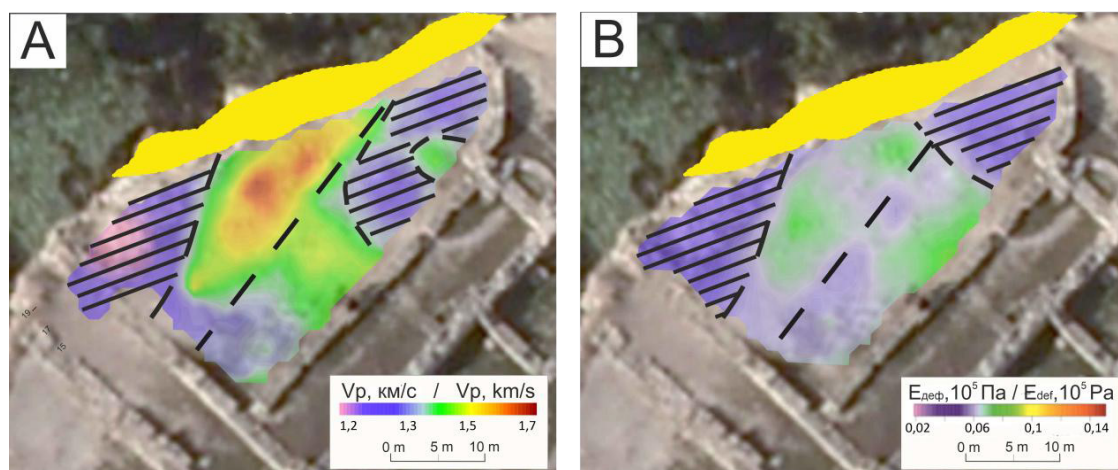


Рис. 7. Локализация ослабленных зон скального массива на картах-срезах изменений скоростей распространения продольных волн  $V_p$  (А) и динамического модуля общей деформации  $E_{\text{деф}}$  (В) для абсолютной отметки 4 м, совмещенных с ортофотопланом территории Уваровской базилики. Штриховкой показаны ослабленные зоны, черной пунктирной линией – формирующиеся трещины отрыва [материалы авторов] /

Fig. 7. Localization of weakened zones in the rock mass on depth-slice maps of changes in P-wave propagation velocity  $V_p$  (A) and dynamic modulus of total deformation  $E_{\text{def}}$  (B) at the absolute elevation of 4 m, overlain on the orthophotomap of the Uvarov Basilica area. The weakened zones are shown by hatching, and the developing detachment cracks are indicated by a black dashed line [authors' materials]

Выявленные аварийные зоны с наименьшими значениями  $E_{\text{деф}}$  угрожают, прежде всего, сохранности апсид центрального и бокового нефов базилики на участках, расположенных в непосредственной близости к обрыву.

## Выводы

Результаты комплексных геофизических исследований позволили выделить ослабленные зоны в объеме массива, влияющие на развитие опасных геологических процессов на аварийном участке городища «Херсонес Таврический».

Комплексирование методов повышает однозначность интерпретации геофизических данных и обеспечивает надежность выявления скрытых ослабленных зон в ус-

ловиях сложного строения прибрежного клифа. Совместная интерпретация данных георадиолокационного зондирования, бесконтактной электротомографии и объемного 3D сейсмотомографического прозвучивания позволила выделить зоны деструкции, которые проявляются одновременно в нескольких независимых геофизических параметрах. Пространственное совпадение аномалий подтверждает их связь с нарушениями в структуре массива.

Наиболее опасные участки приурочены к зонам бронирующего слоя известняков и вероятного развития трещин отрыва вблизи края клифа. Эти участки характеризуются пониженными значениями скоростей Р- и S-волн, снижением расчетных динамических модулей деформации, а также аномалиями электрического сопротивления и георадиолокационного поля.

Выявленные ослабленные участки, представляющие повышенную опасность для устойчивости клифа и сохранности Уваровской базилики, требуют мониторинговых наблюдений, а также проведения инженерно-защитных мероприятий.

Установлено, что комплекс методов на основе технологии СТП 3D является эффективным инструментом для исследований береговых клифов. Разработанная методика позволила сформировать детальную объемную модель скального массива, отражающую геологическое строение, состояние и степень развития опасных геологических процессов скального массива клифа.

## Литература

1. Афанасьев П.И., Медина С.Я., Савон В.Ю., Картайя П.М., Гарсия де ла Круз М.И. Анализ устойчивости откосов горной дороги месторождения Camarioca Este компании Comandante Ernesto Che Guevara // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 4. – С. 78–84. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-4-78-84.
2. Бабенко И.А., Таловина И.В., Ушаков Д.Е., Крикун Н.С. Пегматиты оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида: новые полевые геологические и геофизические данные // Записки Горного института. – 2025. – Т. 273. – С. 65–79.
3. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Зеликман Д.И., Букатов А.А. Локализация зон развития опасных геологических процессов берегового клифа по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания // Russian Journal of Earth Sciences. – 2025. – №. 1. – С. 1–12. DOI: 10.2205/2025es000993.
4. Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Морские берега Крыма. Севастополь: ООО «Колорит», 2019. – 256 с.
5. Данильев С.М., Мулев С.Н., Шнюкова О.М. Корреляционно-регрессионный анализ активности естественной электромагнитной и акустической эмиссии в образцах горных пород Октябрьского месторождения // Горный журнал. – 2024а. – № 9. – С. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08.
6. Данильев С.М., Секерина Д.Д., Данильева Н.А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных // Записки Горного института. – 2024б. – Т. 266. – С. 260–271.
7. Дорохин К.А. Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D- и 3D-построений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 5. – С. 80–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88.
8. Егоров А.С., Агеев А.С., Шуклин И.А., Марков А.Н., Лукин В.В., Горелик Г.Д., Грохотов Е.И. О подобии глубинного строения фундамента и генезиса формирования впадин восточного фланга Восточной Антарктиды и региона озера Байкал // Записки Горного института. – 2025. – Т. 273. – С. 26–41.
9. Ефремова Т.В., Горячкин Ю.Н. Морфодинамика севастопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2023. – № 1. – С. 31–47. DOI: 10.29039/2413-5577-2023-1-31-47.

10. Жерлыгина Е.С., Куранова М.Е., Гусев В.Н., Одинцов Е.Е. Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород // *Горная промышленность*. – 2025. – № 1. – С. 162–169. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-162-169.
11. Поспехов Г.Б., Савон-Васиано Юсмира. Оценка оползневой опасности при предварительной разведке месторождений на северо-востоке Кубы // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 12-1. – С. 178–192. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_178.
12. Ревазов М. О., Мельков Д. А., Бурдзиева О. Г., Архиреева И. Г. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние горных территорий (Кармадонское ущелье) // *Геология и геофизика Юга России*. – 2026. – Т. 16. № 1. – С. 217–227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001.
13. Трушко В.Л., Розанов А.О., Саитгалеев М.М., Петров Д.Н., Ильинов М.Д., Карманский Д.А., Селихов А.А. Критерии акустической эмиссии для анализа процесса разрушения горных пород и оценки формирования трещинных коллекторов на больших глубинах // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 269. – С. 848–858.
14. Шабаров А.Н., Куранов А.Д. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ // *Горный журнал*. – 2023. – № 5. – С. 5–10. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01.
15. Chellamuthu S.N., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P. The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2026. – Vol. 16. No. 1. – pp. 80–92. DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001.
16. Glazunov V.V., Saitgaleev M.M., Sekerina D.D. Features of fracture formation in rock samples under comprehensive compression using acoustic emission // *International Journal of Engineering*. – 2026. – Vol. 39. No. 6. – pp. 1382–1389. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.07.
17. Hellmann S., Grab M., Patzer C., Bauder A., Maurer H. A borehole trajectory inversion scheme to adjust the measurement geometry for 3D travel-time tomography on glaciers // *Solid Earth*. – 2023. – Vol. 14. – pp. 805–821. DOI: 10.5194/se-14-805-2023.
18. Jeong J., Nam M. Electrical resistivity survey on paved surface and case studies // *The Journal of Engineering Geology*. – 2024. – Vol. 34. No. 2. – pp. 295–315. DOI: 10.9720/kseg.2024.2.295.
19. Li C., Wang H., Wang Y., Wang L., Yang X., Wan X. Recognition of tunnel fracture zones in seismic waves and ground-penetrating radar data // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14. No. 3. – Art. No. 1282. DOI: 10.3390/app14031282.
20. Lu J., Liao X., Rastegarnia A., Qajar J. Estimating UCS of South China sandstones using mineralogical and machine learning approaches // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2025. – Parts A/B/C. Vol. 141. Part 1. – Art. No. 104048. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104048.
21. Marciniak A., Kowalczyk S., Gontar T., Owoc B., Nawrot A., Luks B., Cader J., Majdanski M. Integrated geophysical imaging of a mountain landslide – A case study from the Outer Carpathians, Poland // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 191. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104364.
22. Nefedov Yu., Gribanov D., Gasimov E., Peskov D., Han G., Vostrikov N., Pashayeva S. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields // *Reliability: Theory and Applications*. – 2023. – Vol. 18. Special Issue 5(75). – pp. 441–448. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-441-448.
23. Nosov V.V., Borovkov A.I., Artyushchenko A.P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission // *Resources*. – 2022. – Vol. 11. No. 10. – Art. No. 87. DOI: 10.3390/resources11100087.
24. Odintsov E.E., Gusev V.N. Rock mass condition control by the method of predicting of water-conducting fracture zone parameters for the deposits of polymetallic ores // *International Journal of Engineering. Transactions C: Aspects*. – 2026. – Vol. 39. No. 06. – pp. 1326–1333. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.02.
25. Song Z., Zheng J., Zhang R., Zhu A., He T., Wang J. The potential of ground penetrating radar in rock fracture detection: insights from physical model tests and numerical simulations // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2025. – Vol. 18. Issue 4. – pp. 2604–2618. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.04.036.

26. Sujitapan C., Kendall J.M., Chambers J.E., Yordkayhun S. Landslide assessment through integrated geoelectrical and seismic methods: A case study in Thungsong site, southern Thailand // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24660.

27. Ustiugov D.L., Pospekhov G.B., Savon-Vaciano Yu., Noa Segura H.L. Determination of groundwater regime in a metal mineral deposit by data mining and spatial interpolation in the central region of the Republic of Cuba // *Eurasian Mining*. – 2025. – No. 1. – pp. 28–33. DOI: 10.17580/em.2025.01.05.

## References

1. Afanasiev P.I., Medina S.Ya., Savon V.Yu., Kartaya P. M., Garcia DE.LA.C.M.I. The analysis of slope stability of the mining road of the Camarioca Este deposit of the Comandante Ernesto Che Guevara Company. *Occupational Safety in Industry*. 2024. No. 4. pp. 78–84. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-4-78-84. (In Russ.)

2. Babenko I.A., Talovina I.V., Ushakov D.E., Krikun N.S. Pegmatites of the Larsemann Hills oasis, East Antarctica: new field geological and geophysical data. *Journal of Mining Institute*. 2025. Vol. 273. pp. 65–79. (In Russ.)

3. Glazunov V.V., Efimova N.N., Zelikman D.I., Bukatov A.A. Zones localization of hazardous geological processes habit of the coastal cliff according to 3D seismotomography sounding data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025. No. 1. pp. 1–12. DOI: 10.2205/2025es000993. (In Russ.)

4. Goryachkin Yu.N., Dolotov V.V. Sea Coasts of Crimea. Sevastopol. Colorit. 2019. 256 p. (In Russ.)

5. Daniliev S.M., Mulev S.N., Shnyukova O.M. Correlation and regression analysis of natural electromagnetic and acoustic emission activity in rock samples of the Oktyabrsky deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2024. No. 9. pp. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08. (In Russ.)

6. Daniliev S.M., Sekerina D.D., Danilieva N.A. Localization of sites for the development of geomechanical processes in underground workings based on the results of the transformation and classification analysis of seismic data. *Journal of Mining Institute*. 2024. Vol. 266. pp. 260–271. (In Russ.)

7. Dorokhin K.A. Experience of borehole seismic sounding for the assessment of physical state of rock mass using 2D and 3D representations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019. No. 5. pp. 80–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88. (In Russ.)

8. Egorov A.S., Ageev A.S., Shuklin I.A., Markov A.N., Lukin V.V., Gorelik G.D., Grokhotov E.I. On the similarity of deep structure of the basement and genesis of depressions on the eastern flank of East Antarctic and in Lake Baikal region. *Journal of Mining Institute*. 2025. Vol. 273. pp. 26–41. (In Russ.)

9. Efremova T.V., Goryachkin Yu.N. Morphodynamics of Sevastopol Bays under anthropogenic impact. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2023. No. 1. pp. 31–47. DOI: 10.29039/2413-5577-2023-1-31-47. (In Russ.)

10. Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., Odintsov E.E. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. *Russian Mining Industry*. 2025. No. 1. pp. 162–169. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-162-169. (In Russ.)

11. Pospekhov G.B., Savon-Vaciano Y. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 12-1. pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_178. (In Russ.)

12. Revazov M.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Arkhireeva I.G. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of mountain reas (Karmadon gorge). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 217–227. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.31.001. (In Russ.)

13. Trushko V.L., Rozanov A.O., Saitgaleev M.M., Petrov D.N., Ilinov M.D., Karmanskii D.A., Selikhov A.A. Acoustic emission criteria for analyzing the process of rock destruction and evaluating the formation of fractured reservoirs at great depths. *Journal of Mining Institute*. 2024. Vol. 269. pp. 848–858. (In Russ.)

14. Shabarov A.N., Kuranov A.D. Basic development trends in mining sector in complicating

geotechnical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No. 5. pp. 5–10. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01. (In Russ.)

15. Chellamuthu S.N., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P. The role of hydrology in hillslope monitoring and landslide risk mitigation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 80–92. DOI: 10.46698/VNC.2026.14.82.001.

16. Glazunov V.V., Saitgaleev M.M., Sekerina D.D. Features of fracture formation in rock samples under comprehensive compression using acoustic emission. *International Journal of Engineering*. 2026. Vol. 39. No. 6. pp. 1382–1389. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.07.

17. Hellmann S., Grab M., Patzer C., Bauder A., Maurer H. A borehole trajectory inversion scheme to adjust the measurement geometry for 3D travel-time tomography on glaciers. *Solid Earth*. 2023. Vol. 14. pp. 805–821. DOI: 10.5194/se-14-805-2023.

18. Jeong J., Nam M. Electrical resistivity survey on paved surface and case studies. *The Journal of Engineering Geology*. 2024. Vol. 34. No. 2. pp. 295–315. DOI: 10.9720/kseg.2024.2.295.

19. Li C., Wang H., Wang Y., Wang L., Yang X., Wan X. Recognition of tunnel fracture zones in seismic waves and ground-penetrating radar data. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 3. Art. No. 1282. DOI: 10.3390/app14031282.

20. Lu J., Liao X., Rastegarnia A., Qajar J. Estimating UCS of South China sandstones using mineralogical and machine learning approaches. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2025. Parts A/B/C. Vol. 141. Part 1. Art. No. 104048. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104048.

21. Marciniak A., Kowalczyk S., Gontar T., Owoc B., Nawrot A., Luks B., Cader J., Majdanski M. Integrated geophysical imaging of a mountain landslide – A case study from the Outer Carpathians, Poland. *Journal of Applied Geophysics*. 2021. Vol. 191. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104364.

22. Nefedov Yu., Gribov D., Gasimov E., Peskov D., Han G., Vostrikov N., Pashayeva S. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields. *Reliability: Theory and Applications*. 2023. Vol. 18. Special Issue 5(75). pp. 441–448. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-441-448.

23. Nosov V.V., Borovkov A.I., Artyushchenko A.P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission. *Resources*. 2022. Vol. 11. No. 10. Art. No. 87. DOI: 10.3390/resources11100087.

24. Odintsov E.E., Gusev V.N. Rock mass condition control by the method of predicting of water-conducting fracture zone parameters for the deposits of polymetallic ores. *International Journal of Engineering. Transactions C: Aspects*. 2026. Vol. 39. No. 06. pp. 1326–1333. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.02.

25. Song Z., Zheng J., Zhang R., Zhu A., He T., Wang J. The potential of ground penetrating radar in rock fracture detection: insights from physical model tests and numerical simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025. Vol. 18. Issue 4. pp. 2604–2618. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.04.036.

26. Sujitapan C., Kendall J.M., Chambers J.E., Yordkayhun S. Landslide assessment through integrated geoelectrical and seismic methods: A case study in Thungsong site, southern Thailand. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24660.

27. Ustiugov D.L., Pospekhov G.B., Savon-Vaciano Yu., Noa Segura H.L. Determination of groundwater regime in a metal mineral deposit by data mining and spatial interpolation in the central region of the Republic of Cuba. *Eurasian Mining*. 2025. No. 1. pp. 28–33. DOI: 10.17580/em.2025.01.05.