



ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЗОН РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ БЕРЕГОВОГО КЛИФА ПО ДАННЫМ 3D СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЗВУЧИВАНИЯ

В. В. Глазунов¹, Н. Н. Ефимова², Д. И. Зеликман¹ и А. А. Букатов³¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия³ Государственный историко-археологический музей-заповедник «Херсонес Таврический», Севастополь, Россия* **Контакт:** Данил Игоревич Зеликман, s235005@stud.spmi.ru

Предложена методика 3D сейсмотомографического прозвучивания массива горных пород, предназначенная для выявления и локализации зон развития опасных геологических процессов, формирующихся в скальном массиве берегового клифа. Дано описание методики проведения сейсмотомографического прозвучивания для изучения состояния абразионного клифа, расположенного на участке побережья Крыма. По данным сейсмотомографической инверсии синтезированы карты распределения значений скоростей P и S сейсмических волн в скальном массиве на разных глубинах. Рассчитаны динамические модули упругости, характеризующие физико-механические свойства горных пород, слагающих клиф. На картах, отражающих пространственное распределение этих параметров, локализованы ослабленные зоны предположительно связанные с формированием и развитием опасных для устойчивости клифа негативных геологических процессов.

Ключевые слова: Сейсмотомография, сейсмическое прозвучивание, 3D инверсия, модули упругости, физико-механические свойства, устойчивость берегового клифа, побережье Крыма.

Цитирование: Глазунов, В. В., Н. Н. Ефимова, Д. И. Зеликман и А. А. Букатов

Локализация зон развития опасных геологических процессов берегового клифа по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES1001. — DOI: 10.2205/2025es000993 — EDN: ZNNZCA

Введение

В инженерной сейсморазведке в настоящее время широко и успешно применяется сейсмическая томография (СТ) для детального изучения верхней части геологического разреза и прозвучивания межскважинного пространства [Козырев и др., 2022; Разумов и др., 2021; Daniliev et al., 2022]. Наземная методика СТ предусматривает получение 2D сейсмогеологических разрезов, характеризующих геологическое строение в предположении, что скорость распространения сейсмических волн в массиве горных пород возрастает с глубиной [Ленский и др., 2019]. Для локализации зон разуплотнения и трещиноватости в скальном массиве в ряде случаев применяется георадиолокация [Большунов и др., 2023; Isakova et al., 2021].

Цель исследований связана с сейсмогеологическим изучением строения и состояния берегового клифа, включая оценку прочностных свойств пород скального массива, выявление зон развития опасных геологических процессов, влияющих на устойчивость скального массива в области обрыва.

Методика решения аналогичных задач методами геотехники детально разработана для карьеров [Еременко и Филиппов, 2020; Мади и др., 2022; Шабаров и Куранов, 2023].

<https://elibrary.ru/znnzca>

Получено: 23 октября 2024 г.

Принято: 5 февраля 2025 г.

Опубликовано: 12 февраля 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Согласно имеющимся методическим рекомендациям, оценка устойчивости бортов карьеров, откосов уступов и отвалов осуществляется расчетными и графоаналитическими методами. В качестве входных характеристик используются физико-механические свойства массива горных пород [Дашко и Карпенко, 2023]. Изучение физико-механических свойств горных пород проводится лабораторными и полевыми методами, предполагающими проведение точечных буровых работ с извлечением керна. Также в методических указаниях упоминается возможность проведения геофизических методов исследования массива на основе корреляционных связей между наблюдаемым показателем и изучаемыми свойствами [Алексеев и др., 2022a,b].

В отечественных [Опарин и др., 2020; Рыбин и др., 2023, 2015] и зарубежных [Beysen et al., 2023; Hussain et al., 2022; Kabeta et al., 2023] публикациях рассматриваются результаты применения 2D сейсмической томографии (СТ 2D) с поверхности в комплексе с георадиолокацией для определения степени деструкции скального массива.

Для локализации зон развития опасных геологических процессов в области, примыкающей к береговому клифу, методика проведения СТ 2D недостаточно эффективна в связи с ограничениями, обусловленными наличием вертикального обрыва, кривизной береговой линии и возможным присутствием в разрезе слоев с инверсией скорости.

Для этих условий более подходит предлагаемая в статье методика 3D сейсмотомографического прозвучивания (СТП 3D) массива горных пород, слагающих клиф. Методика основана на размещении пунктов приема сейсмических волн (ПП) вдоль основания клифа, а пунктов возбуждения (ПВ) на площади, примыкающей к обрыву, с последующей обработкой данных наблюдений в программах, реализующих 3D инверсию кинематических характеристик сейсмических волн.

Объект исследований

Объектом 3D сейсмотомографического прозвучивания является клиф северного побережья Крыма (рис. 1). Береговая линия находится в трех состояниях: абразии, аккреции и статическом равновесии [Dede et al., 2023]. Доминирующим для района исследований является именно абразия.

Геологическое строение клифа сформировано верхнемиоценовыми отложениями (N1), которые представлены породами сарматского яруса среднего горизонта (N1SII). Толща горных пород сформирована в основном хемогенно-органогенными и частично перекристаллизованными известняками с прослоями глин. Кроме того, в слоистой толще, слагающей клиф, наблюдаются тектонические нарушения (рис. 1).

Слои, сложенные глиной зеленовато-серой, известковистой, твердой, имеют мощность, изменяющуюся в пределах 0,2–0,3 м. Глинистые отложения наименее устойчивы к выветриванию и морской абразии, в них выработаны многочисленные продольные ниши в основании берегового уступа.

Известняки, слагающие клиф, относятся к полускальным и скальным породам. Известняк полускальный обладает очень низкой прочностью, так как характеризуется средней степенью выветрелости и является размягчаемым. В структурном отношении слой этих пород представлен отдельными пропластками, либо сцементированной брекчией крупных обломков известняка. В береговом обрыве известняк выветрелый, встречаются кавернозные полости размером до одного метра. Каверны и трещины выполнены дресвяными суглинками и глиной. Мощность слоя этих известняков варьируется в пределах 1,1–2,0 м.

Известняк скальный, относится к категории малопрочных, трещиноватых, пористых и кавернозных пород. Порода характеризуется грубой слоистостью, разбитой субвертикальными трещинами. Этот известняк является наиболее прочным и устойчивым к выветриванию [Каюкова и др., 2020]. Поверхностный слой известняка слагает нависающие козырьки в береговом уступе и выработанные морские террасы. Процесс разрушения известняка контролируется водонасыщением отдельных участков, в следствии чего меняются их прочностные характеристики [Блохин и др., 2021].



Рис. 1. Стратифицированный геологический разрез абразионного клифа. 1 – суглинки; 2 – известняк скальный; 3 – глина набухающая; 4 – известняк полускальный; красным цветом показаны линии разломов; белыми линиями – границы слоев.

По данным визуального обследования современного состояния клифа и инженерно-геологических изысканий основными экзогенными факторами, обуславливающими обрушения клифа, являются (рис. 2): волноприбойное воздействие на основание клифа; процессы ветрового и температурного выветривания на уступе клифа; фильтрация подземных вод в породах, слагающих клиф; образование трещин отрыва и ослабленных зон в области, прилегающей к обрыву; наличие субгоризонтальных слоев известняков низкой прочности и набухающих глин.

Процесс разрушения горных пород является стадийным и заключается в формировании и дальнейшем развитии дефектов структуры на различных масштабных уровнях [Болобов и др., 2021]. Гидродинамическое воздействие приводит к размыву и ослаблению слоя полускальных известняков, что сопровождается формированием трещин в бронирующем слое прочного известняка. Опасность представляет развитие трещин не только вблизи клифа, но и на удалении от линии обрыва, так как развитие деструктивных процессов приводит к образованию трещин отрыва и последующему разрушению клифа.

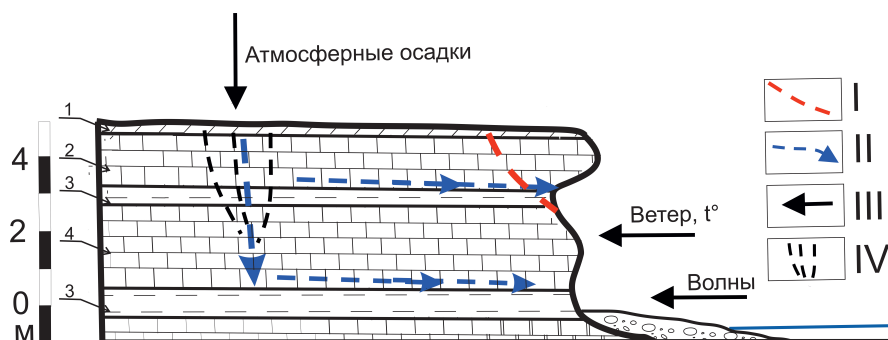


Рис. 2. Экзогенные факторы, влияющие на разрушение берегового уступа. Условные обозначения: I – предполагаемые трещины отрыва; II – движение подземных вод; III – воздействие экзогенных факторов; IV – система трещин (1–4 приведены на рис. 1).

Методика 3D сейсмотомографического прозвучивания скального массива

Основная задача сейсмического обследования клифа сводится к выявлению областей формирования и развития скрытых нарушений массива горных пород, усиливающих степень воздействия перечисленных ранее негативных экзогенных факторов.

Геологическое строение и состояние массива в целом неблагоприятны для проведения сейсмотомографических исследований по стандартной 2D методике [Глазунов

и др., 2022; Сысоев, 2021; Imani et al., 2021]. В первую очередь, это связано с тем, что скорость распространения сейсмических волн не увеличивается с глубиной непрерывно. В разрезе присутствуют «инверсные слои» сложенные глинами, скорость в которых уменьшается по отношению к вышележающим известнякам. Кроме того, береговой обрыв ограничивает возможность соблюдения требований к геометрическим параметрам сети размещения ПП и ПВ, принятым при проведении сейсмотомографических наблюдений.

В этих условиях целесообразно проведение сейсмического прозвучивания массива в модификации СТП 3D, которое можно обеспечить, разместив ПП в основании берегового обрыва с шагом 1 м, а ПВ в узлах квадратной сети 2 × 2 м, созданной на прибрежной террасе (рис. 3).

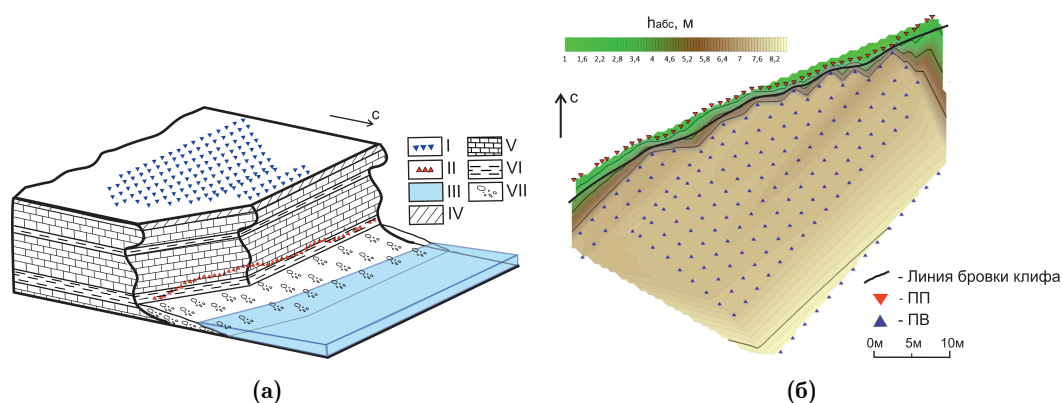


Рис. 3. Размещение ПП и ПВ на площади наблюдений в трехмерном виде относительно обрыва (а) и в плане с топографией (б). I – пункты взрыва; II – пункты приема; III – морская вода; IV – суглинки; V – известняк скальный; VI – глина; VII – известняк полускальный.

Регистрация сейсмических волн производилась с помощью 48-канальной сейсмостанции «Эллис-2» (рис. 4а). В качестве сейсмоприемников использовались вертикальные геофоны в полевом корпусе РС-801 (GS-30СТ). Возбуждение упругих волн производилось ударом кувалды о металлический блин. Для обеспечения синхронизации источника и сейсмостанции использовался сейсмоприемник, установленный вблизи пункта возбуждения. Топографическая привязка ПП и ПВ осуществлялась с помощью тахеометра Leica MS-50 методом выноса реперов в зону проведения работ от ранее известных базовых точек.

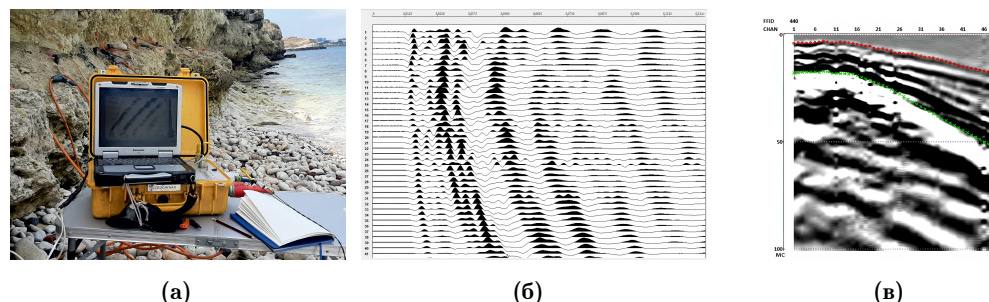


Рис. 4. Сейсмостанция «Эллис-2» (а), наблюдаемая сейсмограмма (б) и ее пикирование с указанием годографов проходящих P- и S-волн (в).

Данные сейсмических наблюдений представлены в виде сейсмограмм (рис. 4б). На сейсмограммах отчетливо проявились оси синфазности продольных (P) и поперечных (S) проходящих сейсмических волн. Уровень помех, связанных с морским прибоем, не затруднял выявление первых вступлений полезных волн на сейсмограммах.

Первичная обработка, включающая частотную фильтрацию для удаления высокочастотных помех и коррекцию амплитуд, выполнена для 598 зарегистрированных сейсмограмм. Пикировка годографов первых вступлений P и S проходящих сейсмических

волн осуществлялась вручную (рис. 4в), количество времен вступлений P - и S -волн составляет 7980 для каждого типа волны. Сейсмотомографическая инверсия выполнялась с учетом координат ПП и ПВ.

Инверсия данных 3D сейсмотомографического прозвучивания скального массива осуществлялась с помощью программы «ZondST3d» (ООО «Геодавайс»), которая предназначена для трехмерной обработки и интерпретации данных сейсмической томографии на преломленных и проходящих волнах в наземном (площадном) и межскважинном геологическом пространстве [Алешкин и др., 2021].

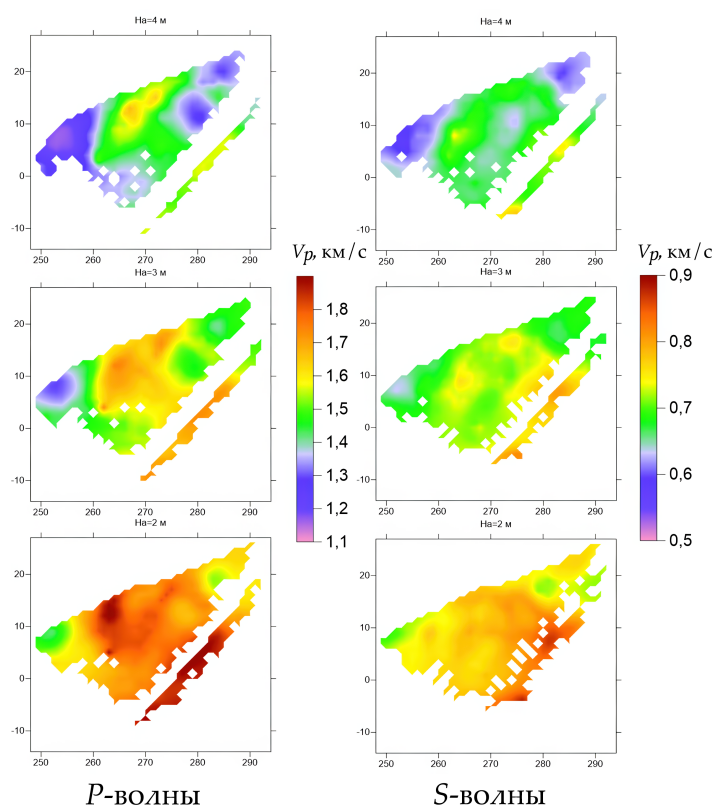


Рис. 5. Карты значений скоростей распространения P и S сейсмических волн в скальном массиве на абсолютных отметках высоты соответственно 2, 3 и 4 метра.

Результаты обработки данных синтезированы в виде 3D цифровых моделей скоростей распространения P и S сейсмических волн в скальном массиве. Протяженная зона на карте, окрашенная белым цветом, соответствуют расположению остатков стены здания, где пункты ПП не размещались.

Локальные, белые ячейки сейсмотомографической модели связаны с наличием локальных неоднородностей, в пределах которых лучи проходящих волн при инверсии не проявились.

На основании 3D кубов скоростных моделей получены карты-срезы для абсолютных отметок 2, 3 и 4 м, характеризующие пространственные изменения скоростей P - и S -волн (рис. 5).

Скорости распространения P волн изменяются в пределах от 1,1 до 2 км/с, а S -волн от 0,5 до 0,9 км/с. Значения укладываются в диапазон скоростей распространения упругих волн в осадочных породах верхней части разреза [Жуков и Кузьмин, 2020]. Области низких значений скоростей, окрашенные на картах в сине-зеленую цветовую гамму, указывают на места локализации ослабленных зон скального массива. В областях, примыкающих к клифу, образование этих зон связано с воздействием процессов физического и химического выветривания. Эти зоны клифа, возможно, отделены от основного массива формирующимися трещинами отрыва.

Возможность использования сейсмических методов для оценки степени устойчивости оползневых склонов базируется на взаимосвязи скоростей распространения упругих волн в среде с прочностными характеристиками пород [Господариков и др., 2023; Aleksandrov and Krizsky, 2023; Bayo et al., 2021].

На рис. 6 представлены карты-срезы для абсолютной отметки 4 м, характеризующие распределение физико-механических свойств, слагающих клиф. На картах пунктирными линиями околтурены аномалии, указывающие на ослабленные зоны горных пород.

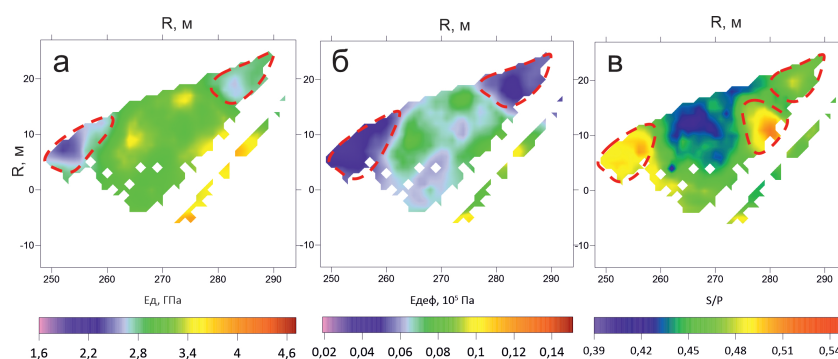


Рис. 6. Локализация ослабленных зон скального массива на картах-срезах распределения значений динамических модулей Юнга (а), общей деформации (б) и отношения скоростей V_s/V_p (в).

Расчёт динамического модуля Юнга (рис. 6а) выполнен по формуле:

$$E_d = \frac{V_p^2 \Delta (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu},$$

где V_p – скорость распространения продольных волн, м/с; Δ – плотность, кг/м³; μ – коэффициент Пуассона [Зуев и др., 2021; Hadi and Nygaard, 2022]. Для срезов на глубинах 2, 3, 4 и 5 м приняты средние значения плотности 2200, 1990, 2050 и 1990 кг/м³ соответственно, установленные по данным лабораторных исследований. Нарушенным участкам соответствуют области значений модуля Юнга менее 2,9 ГПа (рис. 6а).

Модуль деформации (рис. 6б) соответствует коэффициенту пропорциональности между нагрузкой, приложенной к объёму породы, и его деформацией. Формула расчета величины модуля справедлива для известняков плотной и ослабленной зоны. Расчёт выполнен по формуле:

$$E_{\text{деф}} = 4,337 \cdot 10^{-2} \cdot E_d^{1,157},$$

где E_d – динамический модуль Юнга, Па [СП 11-105-97, 2004]. На исследуемом участке ослабленные зоны выделяются в пределах значений модуля деформации от 20 до 70 кПа.

В сейсморазведке для оценки нарушенности массива используется отношение скоростей поперечных и продольных волн [Горяинов и др., 1987; Санфиоров и Степанов, 2022]. Разуплотнение пород массива приводит к увеличению этого параметра.

На карте-срезе, соответствующей абсолютной отметке 4 м, красной пунктирной линией околтурены участки, характеризующиеся низкими значениями физико-механических свойств. В пределах исследованного участка клифа изменение вычисленных параметров определяется в основном интенсивностью и характером разуплотнения горных пород. Срез значений на абсолютной отметке 4 м проходит на уровне залегания бронирующего горизонта известняков. Карты характеризуют степень сохранности этого слоя. Распределение значений рассчитанных параметров на картах указывает на блоковую зональность строения массива.

Выделенные блоки соответствуют ослабленным, наиболее обвалоопасным участкам скального массива, расположенным вблизи клифа.

Выводы

Выполненные исследования показали, что методика СТП 3D является эффективным методом изучения строения и состояния береговых клифов. Особенностью предлагаемой методики является размещение сейсмоприемников вдоль основания клифа, что значительно упрощает проведение полевых работ.

Разработанная методика сейсмических наблюдений позволяет сформировать детальную объемную модель скального массива, отражающую геологическое строение, состояние и наличие зон развития опасных геологических процессов.

Синтезированные по данным СТП 3D сейсмические модели отражают размещение зон ослабленных горных пород, предположительно обусловленных повышенной трещиноватостью известняков. Диагностическими признаками этих зон являются локальные уменьшения скоростей P и S сейсмических волн, а также соответствующие им изменения значений модулей упругости. Особую опасность для устойчивости клифа представляют зоны деструкции известняков, примыкающие к обрыву.

Получаемые с помощью этой новой технологии инженерной сейсморазведки детальные объемные модели скального массива являются основой для изучения динамики развития опасных геологических процессов. Мониторинговые наблюдения с применением предлагаемой технологии позволят выявлять аварийные участки клифа, где скорость его разрушения максимальна.

Технология СТП 3D представляется перспективным направлением развития инженерной сейсморазведки для исследования устойчивости не только клифов, но и бортов карьеров.

Благодарности. Авторы статьи благодарят старшего научного сотрудника Института истории материальной культуры РАН В. В. Вахонеева за предоставление доступа к программе ZondST3D



Список литературы

- Алексеев А. Б., Есина Е. Н., Зотеев О. В. и др. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. — Москва : ИПКОН РАН, 2022а. — 102 с.
- Алексеев А. Б., Есина Е. Н., Зотеев О. В. и др. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. — Москва : ИПКОН РАН, 2022б. — 80 с.
- Алешкин М. В., Ашмарина Ю. Б., Гончаров Е. М. и др. Апробация технологии межскважинного сейсмического просвечивания в модификации расширенной томографии для поиска кимберлитовых тел в условиях Якутской алмазоносной провинции // Инженерная и рудная геофизика. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. — С. 1–11. — DOI: [10.3997/2214-4609.202152143](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152143).
- Блохин Д. И., Иванов П. Н., Дудченко О. Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 1–10. — DOI: [10.31897/PMI.2021.1.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1).
- Болобов В. И., Плащинский В. А., Борисов С. В. и др. О соотношении параметров разрушения породы в статических и динамических условиях // Обогащение руд. — 2021. — С. 3–9. — DOI: [10.17580/or.2021.05.01](https://doi.org/10.17580/or.2021.05.01).
- Большунов А. В., Васильев Д. А., Дмитриев А. Н. и др. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. — 2023. — Т. 263. — С. 724–741. — EDN: WQNJET.
- Глазунов В. В., Бурлуцкий С. Б., Шувалова Р. А. и др. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 771–782. — DOI: [10.31897/PMI.2022.86](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.86).
- Горяинов Н. Н., Боголюбов А. Н., Варламов Н. М. и др. Изучение оползней геофизическими методами. — Москва : Недра, 1987. — С. 155.
- Господариков А. П., Ревин И. Е., Морозов К. В. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит» // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 571–580. — DOI: [10.31897/PMI.2023.9](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9).

- Дашко Р. Э., Карпенко А. Г. Современное состояние надземных и подземных конструкций Александровской колонны - интегральная основа её устойчивости // Записки Горного института. — 2023. — Т. 263. — С. 757–773.
- Еременко А. А., Филиппов В. Н. Определение рациональных параметров буровзрывных работ для обеспечения устойчивости бортов карьеров Быстринского месторождения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7, № 1. — С. 64–73. — DOI: [10.15372/fpvgn2020070110](https://doi.org/10.15372/fpvgn2020070110).
- Жуков В. С., Кузьмин Ю. О. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. — 2020. — Т. 2020, № 4. — С. 39–50. — DOI: [10.31857/S0002333720040109](https://doi.org/10.31857/S0002333720040109).
- Зуев П. И., Григорьев Д. В., Ведерников А. С. Геофизическое обследование участков асбестового карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5–1. — С. 131–141. — DOI: [10.25018/0236_1493_2021_51_0_131](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_131).
- Каюкова Е. П., Дорофеев И. А., Шатунов И. В. Нижнемеловые отложения предгорьев Крыма и их роль в формировании пресных вод Крымского полуострова // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Том XIX. — Санкт-Петербург : Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2020. — С. 246–249.
- Козырев А. А., Каган М. М., Чернобров Д. С. и др. Система микросейсмического мониторинга прибортового массива на основе сейсмических датчиков в глубоких скважинах за конечным контуром карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–1. — С. 155–165. — DOI: [10.25018/0236_1493_2022_121_0_155](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_155).
- Ленский В. А., Жужель А. С., Шарафутдинов Т. Р. Современное состояние скважинной сейсморазведки (ВСП) в России // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2019. — № 1. — С. 29–36. — DOI: [10.30713/2413-5011-2019-1-29-36](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-1-29-36).
- Мади П. Ш., Алькина А. Д., Юрченко А. В. и др. Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров // Омский научный вестник. — 2022. — 4(184). — С. 112–117. — DOI: [10.25206/1813-8225-2022-184-112-117](https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-184-112-117).
- Опарин В. Н., Потапов В. П., Киряева Т. А. и др. К проблеме разработки методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 8. — С. 5–39. — DOI: [10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39).
- Разумов Е. Е., Простов С. М., Рукавишников Г. Д. и др. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга // Горный журнал. — 2021. — С. 8–12. — DOI: [10.17580/gzh.2021.01.02](https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.02).
- Рыбин В. В., Калашник А. И., Константинов К. Н. и др. Комплексный анализ результатов мониторинга устойчивости уступов карьера с использованием геофизических методов исследования // Горная Промышленность. — 2023. — 5S/2023. — С. 87–92. — DOI: [10.30686/1609-9192-2023-5S-87-92](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-87-92).
- Рыбин В. В., Каложный А. С., Константинов К. Н. и др. Результаты определения параметров деструкции борта карьера комплексом геофизических методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 4. — С. 113–118.
- Санфиров И. А., Степанов Ю. И. Комплексная интерпретация шахтных сейсмо- и электроразведочных исследований // Горное эхо. — 2022. — № 1. — С. 113–118.
- СП 11-105-97. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований. — Москва : ФГУП "ПНИИИС"Госстроя России, 2004.
- Сысоев А. П. Обоснование параметров системы полевых наблюдений МОГТ 3D // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2021. — № 3. — С. 40–47. — DOI: [10.20403/2078-0575-2021-3-40-47](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2021-3-40-47).
- 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](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01).
- Aleksandrov P. N., Krizsky V. N. Direct and Inverse Problems of Seismic Exploration of Anisotropic and Dispersive Elastic Media on Volume Integral Equations // Mathematical Models and Computer Simulations. — 2023. — Vol. 15, no. 6. — P. 976–986. — DOI: [10.1134/S2070048223060042](https://doi.org/10.1134/S2070048223060042).
- Bayo A. R., Okiongbo K. S., Sorronadi-Ononiwu G. C. Determination of elastic moduli and bearing capacity of sediments using geophysical and cone penetration test techniques in Yenagoa, Southern Nigeria // NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. — 2021. — Vol. 10, no. 1. — P. 202–217. — DOI: [10.1080/20909977.2021.1904550](https://doi.org/10.1080/20909977.2021.1904550).

- Beyene A., Tesema N., Fufa F., et al. Geophysical and numerical stability analysis of landslide incident // *Heliyon*. — 2023. — Vol. 9, no. 3. — e13852. — DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e13852](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13852).
- Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., et al. Integration of Seismic Refraction and Fracture-Induced Electromagnetic Radiation Methods to Assess the Stability of the Roof in Mine-Workings // *Minerals*. — 2022. — Vol. 12, no. 5. — P. 609. — DOI: [10.3390/min12050609](https://doi.org/10.3390/min12050609).
- Dede M., Susiati H., Widiawaty M. A., et al. Multivariate analysis and modeling of shoreline changes using geospatial data // *Geocarto International*. — 2023. — Vol. 38, no. 1. — DOI: [10.1080/10106049.2022.2159070](https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2159070).
- Hadi F., Nygaard R. Estimating unconfined compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks from petrophysical properties // *Petroleum Science and Technology*. — 2022. — Vol. 41, no. 13. — P. 1367–1389. — DOI: [10.1080/10916466.2022.2092500](https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2092500).
- Hussain Y., Schlögel R., Innocenti A., et al. Review on the Geophysical and UAV-Based Methods Applied to Landslides // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14, no. 18. — P. 4564. — DOI: [10.3390/rs14184564](https://doi.org/10.3390/rs14184564).
- Imani P., El-Raouf A. A., Tian G. Landslide Investigation Using Seismic Refraction Tomography Method: A Review // *Annals of Geophysics*. — 2021. — Vol. 64, Vol. 64 (2021). — DOI: [10.4401/ag-8633](https://doi.org/10.4401/ag-8633).
- Isakova E. P., Daniliev S. M., Mingaleva T. A. GPR for mapping fractures for the extraction of facing granite from a quarry: A case study from Republic of Karelia // *E3S Web of Conferences*. — 2021. — Vol. 266. — P. 07007. — DOI: [10.1051/e3sconf/202126607007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126607007).
- Kabeta W. F., Tamiru M., Tsige D., et al. An integrated geotechnical and geophysical investigation of landslide in Chira town, Ethiopia // *Heliyon*. — 2023. — Vol. 9, no. 7. — e17620. — DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e17620](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17620).

ZONES LOCALIZATION OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES HABIT OF THE COASTAL CLIFF ACCORDING TO 3D SEISMOTOMOGRAPHY SOUNDING DATA

V. V. Glazunov¹, N. N. Efimova², D. I. Zelikman¹, and A. A. Bukatov³

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg

³The State Museum-Preserve «Tauric Chersonese», Sevastopol, Russia

**Correspondence to: Danil Zelikman, s235005@stud.spmi.ru

The article presents a methodology for conducting 3D seismic tomography of rock massifs. This technique has been developed for the identification and localisation of zones of development of dangerous geological processes formed within the rock massif of a coastal cliff. An example of the application of the technique is provided by the results of seismic tomography, which were used to study the state of a coastal cliff in Crimea that is subject to abrasion. The seismic tomographic inversion process has been utilised to generate maps depicting the distribution of *P* and *S* velocity values of seismic waves within the rock massif at varying depths. Furthermore, the dynamic moduli of elasticity, which are indicative of the physical and mechanical properties of the rocks constituting the cliff, have been calculated. The maps that have been generated by the seismic tomographic inversion process reflect the spatial distribution of these parameters, and the maps also localise the zones that have been weakened, presumably as a consequence of the formation and development of negative geological processes that are dangerous for the cliff's stability.

Keywords: Seismic tomography, seismic sounding, 3D inverse modeling, stress-strain properties, competence, cliff, Crimea coast, landslide, tension joint.

Received: 23 October 2024

Accepted: 5 February 2025

Published: 12 February 2025



© 2025. The Authors.

Citation: Glazunov, V. V., N. N. Efimova, D. I. Zelikman, and A. A. Bukatov (2025), Zones Localization of Hazardous Geological Processes Habit of the Coastal Cliff According to 3D Seismotomography Sounding Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES1001, <https://doi.org/10.2205/2025ES000993>, EDN: ZNNZCA

References

- Aleksandrov P. N., Krizsky V. N. Direct and Inverse Problems of Seismic Exploration of Anisotropic and Dispersive Elastic Media on Volume Integral Equations // *Mathematical Models and Computer Simulations*. — 2023. — Vol. 15, no. 6. — P. 976–986. — DOI: [10.1134/S2070048223060042](https://doi.org/10.1134/S2070048223060042).
- Alekseev A. B., Esina E. N., Zoteyev O. V., et al. Methodological guidelines for determining the parameters of quarry sides and benches, open pits and dump slopes. — Moscow : IPKON RAS, 2022a. — 80 p. — (In Russian).
- Alekseev A. B., Esina E. N., Zoteyev O. V., et al. Methodological guidelines for studying rock mass to ensure the stability of quarry sides and benches, open pits and dump slopes. — Moscow : IPKON RAS, 2022b. — 102 p. — (In Russian).
- Aleshkin M., Ashmarina J., Goncharov E., et al. Approbation of Crosshole Seismic Imaging Technology in a Modification of Extended Tomography to Search for Kimberlite Bodies in the Yakutsk Diamondiferous Province // *Engineering and Mining Geophysics 2021*. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. — P. 1–11. — DOI: [10.3997/2214-4609.202152143](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152143). — (In Russian).
- Bayo A. R., Okiongbo K. S., Sorronadi-Ononiwu G. C. Determination of elastic moduli and bearing capacity of sediments using geophysical and cone penetration test techniques in Yenagoa, Southern Nigeria // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. — 2021. — Vol. 10, no. 1. — P. 202–217. — DOI: [10.1080/20909977.2021.1904550](https://doi.org/10.1080/20909977.2021.1904550).
- Bayene A., Tesema N., Fufa F., et al. Geophysical and numerical stability analysis of landslide incident // *Heliyon*. — 2023. — Vol. 9, no. 3. — e13852. — DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e13852](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13852).

- Blokhin D., Ivanov P., Dudchenko O. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation // *Journal of Mining Institute*. — 2021. — Vol. 247. — P. 1–10. — DOI: [10.31897/PMI.2021.1.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1).
- Bolobov V. I., Plashchinsky V. A., Borisov S. V., et al. On the ratio of rock fracture parameters in static and dynamic conditions // *Obogashchenie Rud.* — 2021. — P. 3–9. — DOI: [10.17580/or.2021.05.01](https://doi.org/10.17580/or.2021.05.01). — (In Russian).
- Bolshunov A. V., Vasilev D. A., Dmitriev A. N., et al. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica // *Journal of Mining Institute*. — 2023. — Vol. 263. — P. 724–741. — EDN: WQNJET.
- CP 11-105-97. Code of practice. Engineering geological site investigations for construction. — Moscow : FSUE "PNIIS" of the State Construction Committee of Russia, 2004. — (In Russian).
- Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., et al. Integration of Seismic Refraction and Fracture-Induced Electromagnetic Radiation Methods to Assess the Stability of the Roof in Mine-Workings // *Minerals*. — 2022. — Vol. 12, no. 5. — P. 609. — DOI: [10.3390/min12050609](https://doi.org/10.3390/min12050609).
- Dashko R. E., Karpenko A. G. Current state of above-ground and underground structures of the Alexander Column: an integral basis for its stability // *Journal of Mining Institute*. — 2023. — Vol. 263. — P. 757–773.
- Dede M., Susiati H., Widiawaty M. A., et al. Multivariate analysis and modeling of shoreline changes using geospatial data // *Geocarto International*. — 2023. — Vol. 38, no. 1. — DOI: [10.1080/10106049.2022.2159070](https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2159070).
- Eremenko A. A., Filippov V. N. Determination of rational drilling and blasting parameters to ensure stability of edges of open-pit mines in the Bystrinsky deposit // *Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk*. — 2020. — Vol. 7, no. 1. — P. 64–73. — DOI: [10.15372/fpvgn2020070110](https://doi.org/10.15372/fpvgn2020070110). — (In Russian).
- Glazunov V., Burlutsky S., Shuvalova R., et al. Improving the reliability of 3D modelling of a landslide slope based on engineering geophysics data // *Journal of Mining Institute*. — 2022. — Vol. 257. — P. 771–782. — DOI: [10.31897/PMI.2022.86](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.86).
- Goryainov N. N., Bogolyubov A. N., Varlamov N. M., et al. Study of landslides by geophysical methods. — Moscow : Nedra, 1987. — P. 155. — (In Russian).
- Gospodarikov A., Revin I., Morozov K. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorrskoye deposit of AO Apatit // *Journal of Mining Institute*. — 2023. — Vol. 262. — P. 571–580. — DOI: [10.31897/PMI.2023.9](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9).
- Hadi F., Nygaard R. Estimating unconfined compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks from petrophysical properties // *Petroleum Science and Technology*. — 2022. — Vol. 41, no. 13. — P. 1367–1389. — DOI: [10.1080/10916466.2022.2092500](https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2092500).
- Hussain Y., Schlögel R., Innocenti A., et al. Review on the Geophysical and UAV-Based Methods Applied to Landslides // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14, no. 18. — P. 4564. — DOI: [10.3390/rs14184564](https://doi.org/10.3390/rs14184564).
- Imani P., El-Raouf A. A., Tian G. Landslide Investigation Using Seismic Refraction Tomography Method: A Review // *Annals of Geophysics*. — 2021. — Vol. 64, Vol. 64 (2021). — DOI: [10.4401/ag-8633](https://doi.org/10.4401/ag-8633).
- Isakova E. P., Daniliev S. M., Mingaleva T. A. GPR for mapping fractures for the extraction of facing granite from a quarry: A case study from Republic of Karelia // *E3S Web of Conferences*. — 2021. — Vol. 266. — P. 07007. — DOI: [10.1051/e3sconf/202126607007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126607007).
- Kabeta W. F., Tamiru M., Tsige D., et al. An integrated geotechnical and geophysical investigation of landslide in Chira town, Ethiopia // *Heliyon*. — 2023. — Vol. 9, no. 7. — e17620. — DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e17620](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17620).
- Kayukova E. P., Dorofeev I. A., Shatunov I. V. Deposits of the lower cretaceous in the Crimean foothills and their role in the formation of fresh water Crimean peninsula // *Geology, Geoecology, Evolutionary Geography: Collective Monograph. Volume XIX*. — Saint Petersburg : A. I. Herzen Russian State Pedagogical University, 2020. — P. 246–249. — (In Russian).
- Kozyrev A. A., Kagan M. M., Chernobrov D. S., et al. Microseismic monitoring system of the pit's board array based on seismic sensors in deep boreholes beyond the final pit contour // *Mining informational and analytical bulletin*. — 2022. — No. 12–1. — P. 155–165. — DOI: [10.25018/0236_1493_2022_121_0_155](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_155). — (In Russian).
- Lensky V. A., Zhuzhel A. S., Sharafutdinov T. R. Modern condition of a well seismic survey (WSS) in Russia // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. — 2019. — No. 1. — P. 29–36. — DOI: [10.30713/2413-5011-2019-1-29-36](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-1-29-36). — (In Russian).
- Madi P. Sh., Alkina A. D., Yurchenko A. V., et al. Fiber-optic system for monitoring stability of quarry slopes // *Omsk Scientific Bulletin*. — 2022. — 4(184). — P. 112–117. — DOI: [10.25206/1813-8225-2022-184-112-117](https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-184-112-117). — (In Russian).
- Oparin V. N., Potapov V. P., Kiryaeva T. A., et al. Development of methods and means for integrated geo-information-based analysis of influence exerted by nonlinear deformation and wave processes induced by seismic forces on geomechanical behavior of pit walls and on gas-dynamic activity in coal mines in Kuzbass // *Mining informational and analytical bulletin*. — 2020. — No. 8. — P. 5–39. — DOI: [10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39). — (In Russian).

- Razumov E. E., Prostov S. M., Rukavishnikov G. D., et al. Basic principles for building seismic monitoring systems in rockburst-hazardous coal seam mining // *Gornyi Zhurnal*. — 2021. — P. 8–12. — DOI: [10.17580/gzh.2021.01.02](https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.02). — (In Russian).
- Rybin V. V., Kalashnik A. I., Konstantinov K. N., et al. Results on detection of open-pit wall destruction parameters by complex of geophysical methods // *Mining informational and analytical bulletin*. — 2015. — No. 4. — P. 113–118. — (In Russian).
- Rybin V. V., Kalashnik A. I., Konstantinov K. N., et al. A comprehensive analysis of results obtained in monitoring pit bench stability using geophysical survey methods // *Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost)*. — 2023. — 5S/2023. — P. 87–92. — DOI: [10.30686/1609-9192-2023-5S-87-92](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-87-92). — (In Russian).
- Sanfirov I. A., Stepanov Yu. I. Complex interpretation of mine seismic and electrical exploration studies // *Gornoe Ekho*. — 2022. — No. 1. — P. 113–118. — (In Russian).
- Shabarov A. N., Kuranov A. D. Basic development trends in mining sector in complicating geotechnical conditions // *Gornyi Zhurnal*. — 2023. — No. 5. — P. 5–10. — DOI: [10.17580/gzh.2023.05.01](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01). — (In Russian).
- Sysoev A. P. Substantiation of parameters of the 3D CDP field observation system // *Geology and mineral resources of Siberia*. — 2021. — No. 3. — P. 40–47. — DOI: [10.20403/2078-0575-2021-3-40-47](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2021-3-40-47). — (In Russian).
- Zhukov V. S., Kuzmin Yu. O. The Influence of Fracturing of the Rocks and Model Materials on P-Wave Propagation Velocity: Experimental Studies // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2020. — Vol. 56, no. 4. — P. 470–480. — DOI: [10.1134/S1069351320040102](https://doi.org/10.1134/S1069351320040102).
- Zuev P. I., Grigoriev D. V., Vedernikov A. S. Geophysical survey of asbestos pit wall // *Mining informational and analytical bulletin*. — 2021. — No. 5–1. — P. 131–141. — DOI: [10.25018/0236_1493_2021_51_0_131](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_131). — (In Russian).