

ВОЗДУШНОЕ ГЕОСКАНИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЕКТОВ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ ТОННЕЛЕЙ: ОБОБЩЕНИЕ СЛУЧАЕВ ИЗ ПРАКТИКИ В НОРВЕГИИ И ИНДИИ

РАСМУССЕН А.Х.

Компания EMerald Geomodelling,
г. Осло, Норвегия

ЛИНАРЕС Г.М.

Компания EMerald Geomodelling,
г. Осло, Норвегия

КРИСТЕНСЕН К.В.

Компания EMerald Geomodelling,
г. Осло, Норвегия
cch@emrld.no

МАЛИК С.

Государственная компания NHIDCL
(Национальная корпорация развития
автомобильных дорог и
инфраструктуры), г. Нью-Дели, Индия

СКУРДАЛ Г.Х.

Компания EMerald Geomodelling,
г. Осло, Норвегия

ПФАФФХУБЕР А.А.

Компания EMerald Geomodelling,
г. Осло, Норвегия

АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный адаптированный перевод статьи норвежских и индийских исследователей «Воздушное геосканирование как инструмент инженерных изысканий для крупномасштабных проектов по строительству тоннелей: обобщение случаев из практики в Норвегии и Индии» (Rasmussen et al., 2021). Она была опубликована в 2021 году в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Rasmussen et al., 2021) приведена в конце.

Непредвиденные сложные грунтовые условия являются серьезным препятствием для развития инфраструктуры, включая строительство тоннелей. Устранение этого риска с помощью традиционных интрузивных наземных исследований грунтовых массивов может оказаться затратным, а иногда и непомерно дорогим. В представленной статье рассматривается воздушное геосканирование – более эффективный метод изысканий, который объединяет результаты аэрогеофизических исследований с другими наборами данных для создания инженерно-геологических моделей. В первую очередь в рассматриваемых в статье случаях использовалась электромагнитная съемка во временной области с вертолета (airborne electromagnetics, AEM), результаты которой отображают различия в удельном электрическом сопротивлении (УЭС) подповерхностных материалов. Для более сложной интерпретации можно объединить эту геофизическую информацию с вспомогательными наборами данных, если они доступны. Такой интегрированный процесс авторы переведенной статьи называют воздушным геосканированием. Методы интеграции варьируют от простого кластерного анализа, который поддерживает планирование последующих наземных исследований, до использования специализированных искусственных нейронных сетей, которые автоматически определяют границы раздела, например кровлю скальных пород.

В статье проиллюстрированы сильные и слабые стороны применения аэрогеофизических методов на примерах проектов строительства тоннелей в Норвегии и Индии. Продемонстрированы три ключевые возможности, которые воздушное геосканирование может предоставить

инженерам-тоннелестроителям, – выявление основных зон трещиноватости и более слабых участков скальных пород вдоль планируемого тоннеля, а также мощности скальных грунтов над ним. Эта информация может оказаться очень ценной для проектирования и строительства тоннелей по всему миру.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерные изыскания; проектирование тоннелей; строительство тоннелей; аэрогеофизические исследования; бортовая электромагнитная съемка; воздушное геосканирование.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Расмуссен А.Х., Линарес Г.М., Кристенсен К.В., Малик С., Скурдал Г.Х., Пфаффхубер А.А. Гудмундсон Л, Кирхнер Й., Гедеке А., Нецли Й., Бискаборн Б.К. Воздушное геосканирование как инструмент инженерных изысканий для крупномасштабных проектов по строительству тоннелей: обобщение случаев из практики в Норвегии и Индии (пер. с англ.) // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 7-8. С. ...-.... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-7-8-...-....

AIRBORNE GEOSCANNING AS A SITE INVESTIGATION TOOL IN LARGE-SCALE TUNNELLING PROJECTS: A SYNTHESIS OF CASE STUDIES FROM NORWAY AND INDIA

RASMUSSEN A.H.

EMerald Geomodelling company, Oslo, Norway

LINARES G.M.

EMerald Geomodelling company, Oslo, Norway

CHRISTENSEN C.W.

EMerald Geomodelling company, Oslo, Norway
cch@emrld.no

MALIK S.

National Highways & Infrastructure Development Corporation Limited, New Delhi, India

SKURDAL G.H.

EMerald Geomodelling company, Oslo, Norway

PFÄFFHUBER A.A.

EMerald Geomodelling company, Oslo, Norway

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Airborne geoscanning as a site investigation tool in large-scale tunnelling projects: a synthesis of case studies from Norway and India” by Norwegian and Indian researchers (Rasmussen et al., 2021). It was published in 2021 in the journal “Earth and Environmental Science” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Rasmussen et al., 2021) used for the presented translation is given in the end.

Unforeseen, challenging ground conditions are a major obstacle for infrastructure development, including tunnel construction. Addressing this risk with traditional, intrusive ground investigations can be costly, sometime prohibitively so. In this paper, we present airborne geoscanning, a more efficient site investigation method that integrates airborne geophysics with other datasets to produce ground models. We primarily employ helicopter-based time-domain electromagnetics (AEM), a method that images differences in electrical resistivity in the subsurface. When available, we can combine geophysical data with ancillary datasets for more sophisticated interpretation. Such an integrated process we call airborne geoscanning. The integration techniques range from simple clustering analysis that support planning of follow-up ground investigations to customised artificial neural networks that automatically detect interfaces like the top of rock.

Using examples from projects in Norway and India, we illustrate the strengths and weaknesses of using airborne geophysics for tunnelling projects. Using these case studies, we demonstrate three key insights that airborne geoscanning can provide to tunnelling engineers, i. e. identify major fractured zones, weaker rock units and rock cover thickness. These insights can be highly valuable for tunnel design and construction projects worldwide.

KEYWORDS:

site investigation; tunnel design; tunnel construction; aerogeophysical survey; airborne time-domain electromagnetics (AEM); airborne geoscanning.

FOR CITATION:

Rasmussen A.H., Linares G.M., Christensen C.W., Malik S., Skurdal G.H., Pfaffhuber A.A. Vozdushnoye geoskanirovaniye kak instrument inzhenernyh izyskaniy dlya krupnomasshtabnyh proyektov po stroitel'stvu tonneley: obobshcheniye sluchayev iz praktiki v Norvegii i Indii [Airborne geoscanning as a site investigation tool in large-scale tunnelling projects: a synthesis of case studies from Norway and India] (translated from English into Russian) // GeoInfo. 2024. Т. 6. № 7-8. С. ...-.... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-7-8-...-.... (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Непредвиденные сложные грунтовые условия являются серьезным препятствием для развития инфраструктуры, включая строительство тоннелей. Это одна из основных причин того, что для 90% проектов транспортной инфраструктуры во всем мире итоговые затраты превышают запланированные, причем для тоннелей они в среднем больше на 50% [1]. Традиционные методы исследований путем инженерно-геологического бурения помогают снизить неопределенность в отношении грунтовых условий, но они могут быть дорогостоящими, отнимать много времени и предоставлять лишь прерывистую информацию, то есть только для отдельных точек. К тому же сложный рельеф или удаленность места изысканий иногда могут сделать бурение и сбор соответствующих данных невозможными.

Применение таких непрямых (косвенных) методов исследований, как аэрогеофизические, дает возможность получать предварительную информацию для крупных проектов по строительству тоннелей. В частности, бортовая электромагнитная съемка (airborne electromagnetics, АЕМ), которая первоначально использовалась для горнодобывающей промышленности, около 10 лет назад начала применяться в инженерных целях для проектирования и строительства тоннелей, а в последние 3–5 лет – все чаще и чаще [2–4]. Несмотря на то что исследования методом АЕМ являются косвенными и менее точными, чем интрузивные наземные, они позволяют получать непрерывные данные на больших площадях и дают ключевую информацию о грунтовых условиях на протяжении всего срока развития проекта. Ее интеграция с другими геотехническими данными дает возможность создавать более качественные модели грунтовых массивов. Такой комбинированный процесс будем называть *воздушным геосканированием*.

Чтобы продемонстрировать полезность воздушного геосканирования, в статье будет приведена обобщенная информация по четырем случаям из практики планирования, проектирования и строительства тоннелей в Норвегии и Индии. Данные по первым трем из них ранее не публиковались, а информация по четвертому впервые была представлена в работе [5]. В этих случаях из практики рассматриваемый метод использовался для выявления основных зон трещиноватости, участков более слабых скальных грунтов, а также

для определения толщины скальных пород над тоннелем. Во многих случаях полученные таким путем результаты были неопределимы для эффективного планирования последующих исследований и для оптимизации проектов тоннелей и их трасс, причем гораздо раньше, чем это было бы возможно с использованием только интрузивных наземных исследований.

Настоящая статья представляет собой первый в известной авторам литературе обзор международных данных по воздушному геосканированию для строительства тоннелей. Читателям будет интересно узнать о сопоставлении результатов по разным геологическим средам, а также об инновационном применении машинного обучения в некоторых из рассмотренных случаев.

МЕТОДЫ ►

Бортовая электромагнитная съемка (АЕМ) ►

Исследования методом АЕМ, использованные в качестве основы для примеров, рассмотренных в статье, проводились с вертолета. Пролетая на низких высотах (30–150 м), можно было быстро собирать геофизические данные с высоким разрешением. Данные собирались вдоль запланированных трасс будущих тоннелей и почти параллельных им линий рядом, обычно на расстояниях 75–200 м друг от друга, что обеспечивало единообразный обзор состояния грунтовых массивов. Эти электромагнитные данные применялись для создания 3D моделей удельных электрических сопротивлений (УЭС), или геоэлектрических моделей, по которым можно было интерпретировать геологические условия.

В приборе для электромагнитной съемки во временной области (time domain electromagnetic, TEM) переменный ток, создаваемый генератором, проходит по катушке и генерирует электромагнитное поле [6], периодические импульсы которого проникают под поверхность земли. При отключении поля в конце каждого импульса в подповерхностном пространстве возникают вихревые токи, последующее постепенное затухание и распространение которых в грунтах и наружу происходят в зависимости от электрических сопротивлений и геометрии геологических тел. Измерения над поверхностью земли вторичных электромагнитных полей, создаваемых этими вихревыми токами на ранних стадиях после отключений первич-

ного тока, позволяют исследовать грунты на небольшой глубине. Позднее временные селекторы выделяют из всей последовательности импульсы, появляющиеся в определенные моменты времени, и дают информацию о грунтах на большей глубине. Таким путем можно получать информацию о подповерхностных условиях до глубины 400–800 м в зависимости от используемых приборов, их настройки и геологических особенностей местности.

Методы интерпретации ►

Для интерпретации геоэлектрических моделей использовались несколько методов в зависимости от потребностей проекта и доступности вспомогательных данных (в порядке возрастания сложности и автоматизации): анализ изообъемов, кластерный анализ, выявление поверхностей раздела с помощью искусственного интеллекта.

Анализ изообъемов применяется в случаях, когда достоверные данные наземных исследований ограничены и когда для проекта особенно важна трехмерная геометрия комплексов пород. На основе гистограммы распределения значений УЭС или проверки перекрывающихся диаграмм скважинных геофизических исследований специалист выбирает репрезентативные интервалы УЭС и извлекает изообъемы из трехмерной сетки удельных сопротивлений. Визуализация данных объемов вместе с запланированными будущими тоннелями позволяет оптимизировать прохождение трасс этих подземных сооружений таким образом, чтобы избежать зон слабых грунтов или нежелательных комплексов пород, которые часто имеют тенденцию к более низким величинам УЭС.

Кластерный анализ наиболее полезен для планирования наземных изысканий после бортовой электромагнитной съемки. Этот метод объединяет участки на поверхности со схожими вертикальными профилями УЭС, позволяя быстро оценить неоднородность территории, собрать объективную стратифицированную выборку геологических данных для нее, а затем выполнить в нужных местах бурение инженерно-геологических скважин.

Когда объектом исследования становится конкретная граница/поверхность раздела, то для ее выявления применяется *автоматизированный алгоритм на основе искусственного интеллекта*. В этом алгоритме в качестве обучающих данных используются резуль-

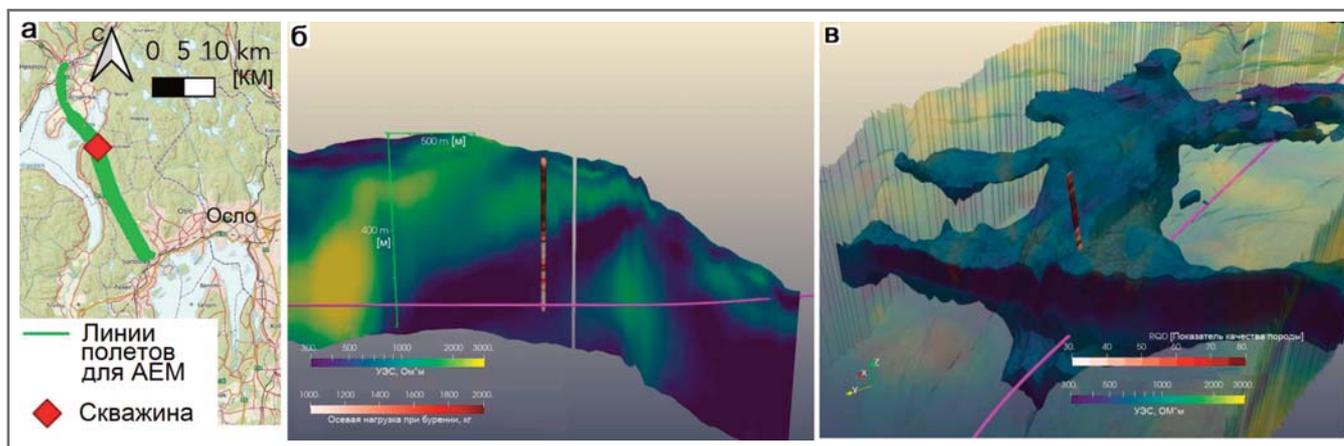


Рис. 1. Зона более слабых, более трещиноватых грунтов, обнаруженная с помощью АЕМ с последующим подтверждением данными бурения с отбором образцов керна: а – зона исследований методом АЕМ и пример расположения инженерно-геологической скважины на карте; б – вертикальный геоэлектрический разрез и геологическая колонка скважины; в – трехмерное наклонное изображение зоны с низким УЭС. Трасса тоннеля показана ярким розово-пурпурным цветом (цветом фуксии). Использовано 3-кратное вертикальное увеличение

таты определения данной границы по обнажениям, скважинам, шурфам, другим выемкам грунта и т. д. Затем пространственные координаты и модели УЭС на основе съемок методом АЕМ передаются в искусственную нейронную сеть (artificial neural network, ANN), которая предсказывает глубину расположения этой границы раздела [7]. Если достоверные результаты наземных исследований недоступны, то вместо них в качестве обучающих данных могут использоваться точки, для которых была выполнена ручная интерпретация. Описанная методика часто применяется для определения границы раздела между коренной скальной породой и осадочными грунтами (то есть глубины залегания кровли материнской породы) [8], а также для выявления любой границы раздела с контрастными удельными сопротивлениями по обе стороны от нее, например подошвы торфяных отложений [9].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ►

Определение основных зон трещиноватости (Норвегия) ►

Совместный проект строительства железной дороги и автомагистрали в лесной зоне, названный FRE16 (от норв. Fellesprosjekt Ringeriksbanen E16) был запущен в 2015 году для того, чтобы соединить город Саннвика, расположенный рядом со столицей Норвегии Осло, и город Хёнефосс новыми железной и автомобильной дорогами протяженностью 40 км.

Этот проект включил в себя с южной стороны железнодорожный тоннель длиной 23 км. В июне 2016 года для не-

го были собраны данные АЕМ по профилям общей протяженностью 655 км (рис. 1, а).

Результаты геофизических съемок показали, что планируемая трасса тоннеля пересекает в основном скальные породы с высокими значениями УЭС (высокоомные), предположительно прочные. Но она пересекает и крупный участок с низкими величинами УЭС (низкоомный) вблизи северного портала (рис. 1, б). Более поздние исследования образцов керна подтвердили, что эта низкоомная зона совпадает с переходом от вулканических пород (ромбовидного порфира, базальта) к осадочным (песчанику, алевролиту, аргиллиту), а также с уменьшением сопротивления бурению (см. рис. 1, б) и снижением показателя качества породы RQD (Rock Quality Designation) (рис. 1, в). Данная особенность сохранялась перпендикулярно направлению запланированной трассы тоннеля (см. рис. 1, в), и эту зону невозможно было обойти без небольшой корректировки трассы.

Есть еще одна зона грунтов с низкими значениями УЭС, расположенная ниже трассы тоннеля. Она вытянута, и ее направление совпадает с направлением узкой долины на поверхности земли, поэтому можно предположить, что это зона разлома. К счастью, запланированная трасса сооружения не пересекала эту низкоомную зону.

Выявление зон слабых скальных грунтов (Индия) ►

Не так давно воздушное геосканирование было использовано для двух проектов по строительству высокогорных автодорожных тоннелей на севере Ин-

дии. Первый длиной 6,5 км к моменту написания настоящей статьи находился на стадии выемки грунта, а второй длиной 14 км еще был на этапе планирования и проектирования.

В первом случае геосканирование было предпринято прежде всего для демонстрации и верификации работы этого метода, тогда как во втором случае оно использовалось для поддержки уже шедших наземных исследований, достоверных данных по которым было еще недостаточно.

На обоих участках коренные породы являются метаморфическими и имеют низкое и среднее качество. Формация Зоджила, сложенная аспидным (агломератным) сланцем, кристаллическим сланцем и филлитом (кварц-серцитовым сланцем), и формация Панджалских траппов, сложенная метабазитом, встречаются на обоих участках, а агломератные сланцы – на втором участке. В обоих случаях геосканирование в основном применялось для картирования слабых филлитовых пород.

Пример 1

Результаты геосканирования показали, что центральная часть трассы будущего тоннеля сложена в основном породами с очень высокими величинами УЭС (более 1000 Ом*м), а припортальные части – породами либо со средними (100–400 Ом*м), либо с низкими (менее 50 Ом*м) значениями УЭС. Низкоомные зоны хорошо коррелировали с крупными сдвиговыми зонами, обнаруженными вблизи границ между формациями Зоджила и Панджалских траппов. Высокоомные зоны соответствовали более прочным породам формации

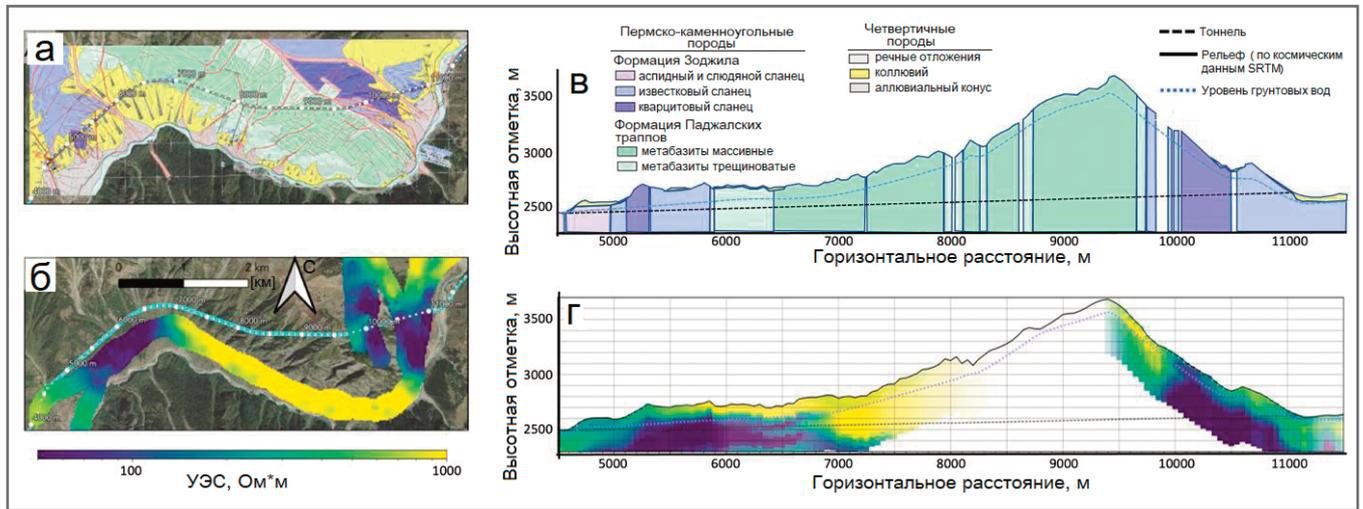


Рис. 2. Геологическая карта рассматриваемой территории (по [10]) (а); горизонтальный срез модели УЭС, полученной методом АЕМ, по глубине 200 м от поверхности земли (б); геологический разрез вдоль трассы тоннеля (по [11]) (в); геоэлектрический разрез по той же линии (г)

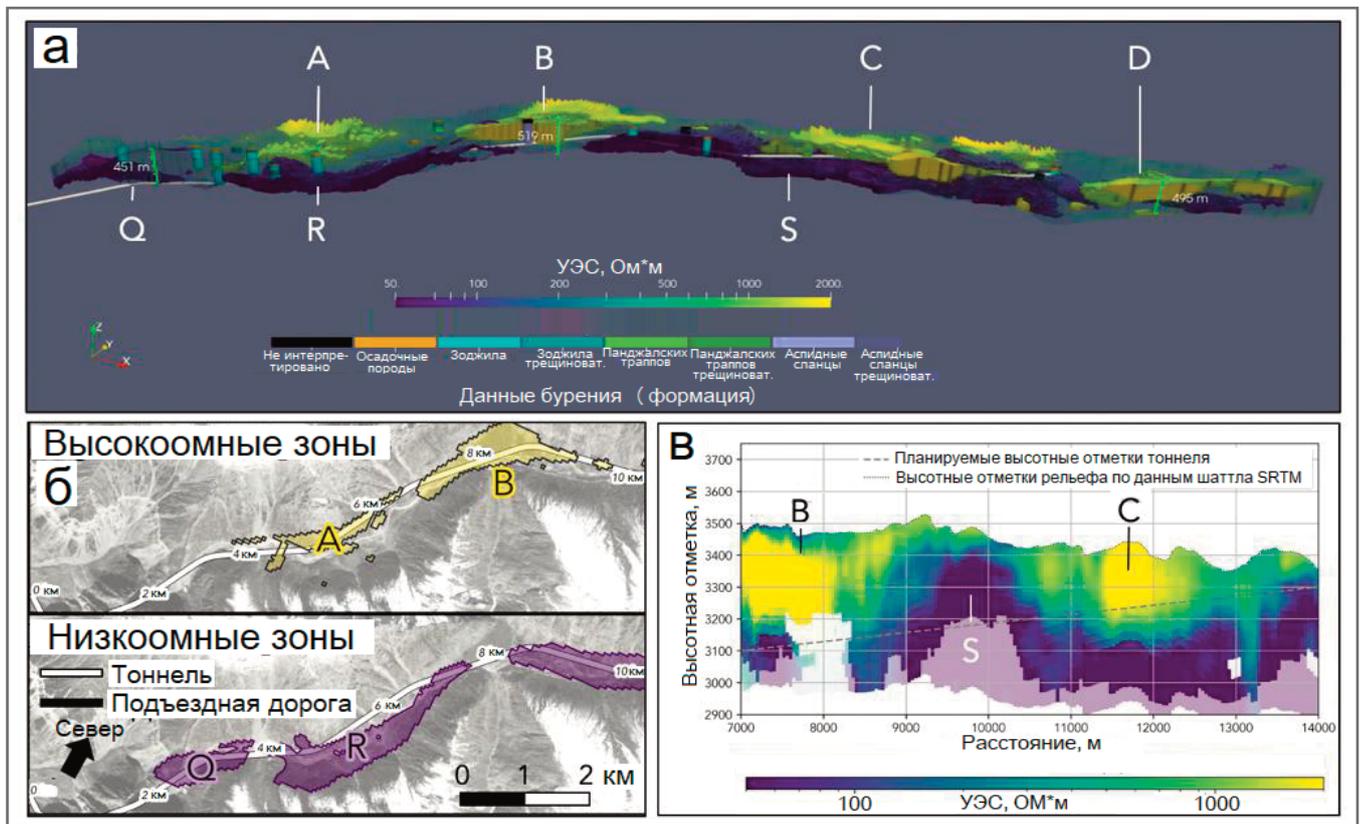


Рис. 3. 3D изображение геоэлектрической модели вдоль трассы тоннеля (показанной белой линией) с указанием высокоомных (А, В, С, D) и низкоомных (Q, R, S) зон со значениями УЭС более 1000 Ом*м и менее 100 Ом*м соответственно (а); карты с максимально протяженными высокоомными зонами А, В и низкоомной зоной R (б); вертикальный разрез геоэлектрической модели и планируемого тоннеля (в)

Панджалских траплов. Прямое сравнение значений УЭС и инженерно-геологических разрезов в некоторых центральных частях будущего тоннеля (протяженностью 9000 м) было невозможно, поскольку вертолет не мог пролететь непосредственно над его трассой из-за очень крутого рельефа.

Эти корреляции очевидны при взгляде как на карту, так и на разрез

(рис. 2). Кроме того, в некоторых зонах виден переход от более высоких значений УЭС к более низким у поверхности, что, по-видимому, хорошо коррелирует с ожидаемым уровнем грунтовых вод в этих местах. Данные результаты также согласуются с наблюдениями, сделанными геологами при полевых исследованиях. В западной и восточной припортальных зонах в процессе взрыв-

ных работ были обнаружены слабые породы, что замедлило ход строительства. Напротив, при выемке грунта в центральной части тоннеля были встречены породы хорошего качества.

Пример 2

С учетом того что на первом участке низкоомные породы соответствовали слабым грунтам, а высокоомные – проч-

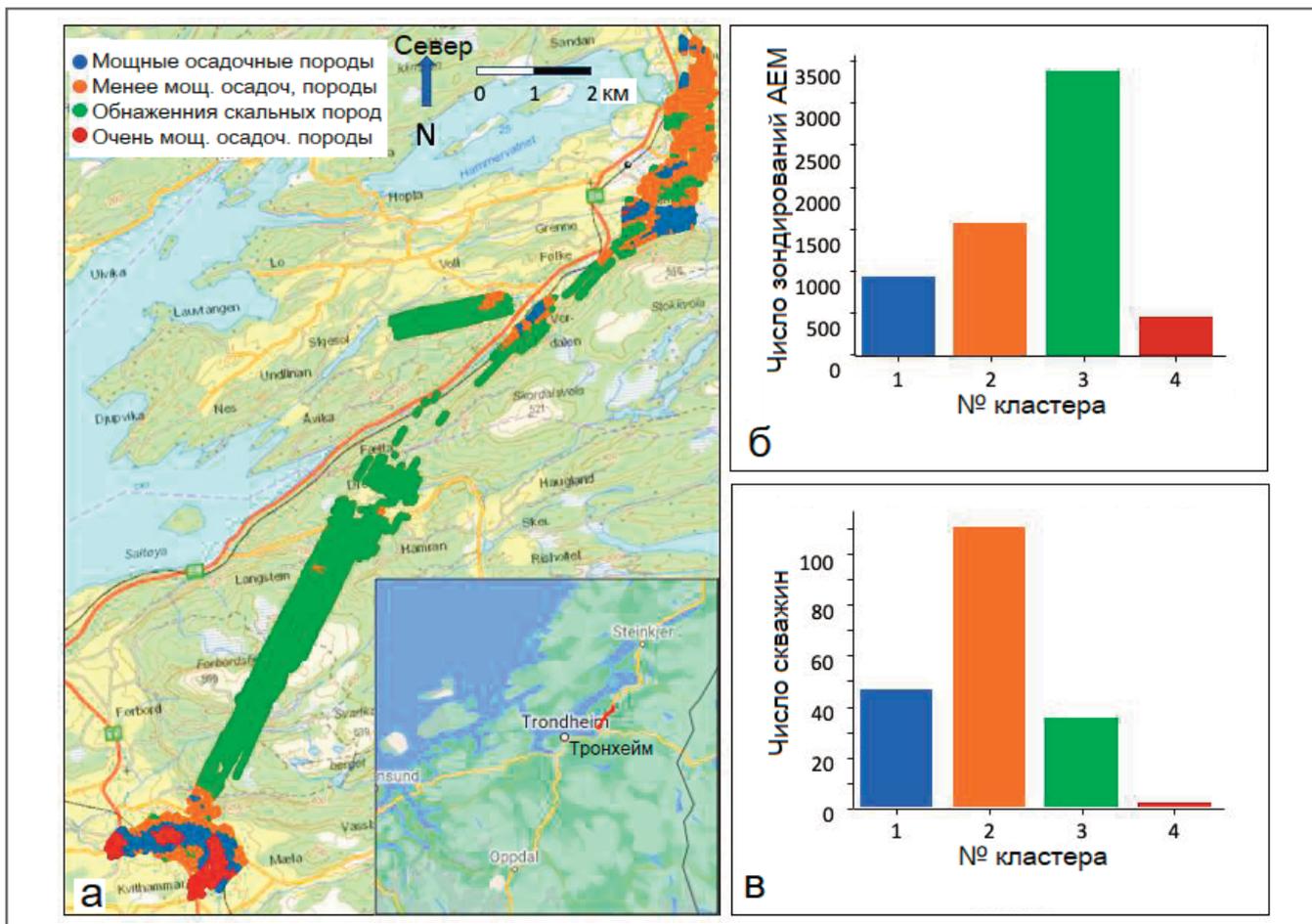


Рис. 4. Карта данных, разбитых на 4 кластера в соответствии со значениями УЭС (а); распределение по кластерам количеств зондирований методом АЕМ (б); распределение по кластерам количеств инженерно-геологических скважин, доступных для исследований в июне 2019 года (в)

ным, были визуализированы зоны с низкими и высокими значениями УЭС в качестве примеров зон, сложенных слабыми и прочными грунтами. В частности, были визуализированы области с УЭС более 1000 Ом*м и менее 100 Ом*м вдоль трассы тоннеля в 3D варианте. В результате удалось выделить четыре высокоомные (обозначенные как А, В, С, D на рисунке 3) и четыре низкоомные (Q, R, S на рисунке 3) зоны.

Визуализировав эти зоны вдоль планируемого тоннеля в 3D варианте, можно увидеть, что его трассу, по-видимому, удобно проложить в горизонтальном направлении. Например, на западе, между пятым и седьмым километрами, тоннель обходит низкоомную зону R, которая скорее всего соответствует слабым грунтам. Но все-таки могут быть оправданными некоторые корректировки по вертикали. Планируемый тоннель протягивается вблизи нижних границ зон В и С. Поэтому, чтобы он не прошел сквозь эти глубоко расположенные низкоомные зоны скальных грунтов, может оказаться полезным небольшое увеличение высотных отметок его трассы.

Оценка мощности скальных грунтов над тоннелем (Норвегия) ▶

В начале 2019 года началось планирование нового 19-километрового участка двухполосной автомагистрали, находящегося примерно в 30 км к северо-востоку от норвежского города Тронхейм (рис. 4). В этом районе глубина залегания коренных пород сильно варьирует – от выступающих на поверхность до залегающих на глубине в десятки метров под слоем слабой глины. Это создавало значительные инженерные трудности при планировании трассы магистрали.

Ранее в этом районе было пробурено и исследовано несколько инженерно-геологических скважин. Инженеры спрогнозировали, что потребуется пробурить еще 600 скважин, чтобы в достаточной степени снизить геологическую неопределенность в широком коридоре, но в июне 2019 года перед началом первой крупной кампании по бурению было решено применить также воздушное геосканирование [12].

В качестве исходных данных для планирования первой крупной буровой кампании были использованы результаты кластерного анализа геофизических данных. Аналитики интерпретировали полученные четыре кластера (рис. 4, а) как соответствующие: осадочным отложениям большой мощности; осадочным отложениям меньшей мощности; выходящим на поверхность скальным породам; осадочным отложениям очень большой мощности. Сравнивая распределение принадлежности к кластерам геофизической модели (рис. 4, б) с данными по скважинам (рис. 4, в), обнаружили, что зоны осадочных пород очень большой толщины были недостаточно опробованы с помощью бурения по сравнению с зонами осадочных пород большой толщины, в то время как для зон осадочных отложений небольшой мощности данные по скважинам были избыточными. Также стоит заметить, что для выходящих на поверхность скальных пород количество информации по скважинам было недостаточным, но эти грунты можно было оценить непосредственно на поверхности,

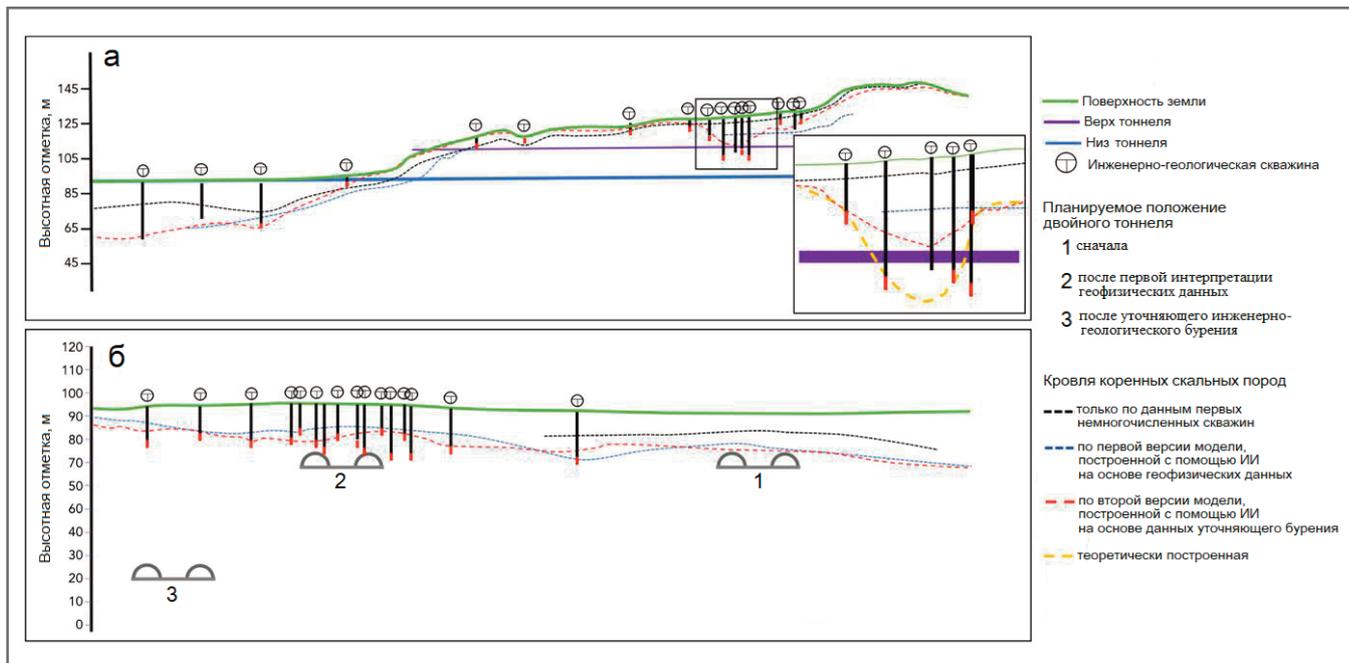


Рис. 5. Эволюция модели кровли коренных пород и тоннеля в продольном разрезе: а – для участка Груббосен; б – для участка Фоссингельва. Также показаны три варианта расположения двойного тоннеля, рассмотренные в ходе развития модели (по [5]). ИИ – искусственный интеллект

что и помогло инженерам правильно расставить приоритеты в отношении бурения при аномально мощных коренных породах.

С помощью искусственной нейронной сети получили модель кровли коренных скальных пород и выполняли ее обновления. Первая версия модели была построена через несколько дней после сбора геофизической информации, а впоследствии она многократно обновлялась после каждой крупной кампании по сбору данных инженерно-геологического бурения. Даже первая версия модели, для создания которой использовалась только информация по ранее пробуренным немногочисленным скважинам, указывала на два таких места, как Груббосен и Фоссингельва, где не было скальных грунтов на уровне тоннеля, хотя до этого предполагалось, что их мощность достаточна (рис. 5).

По первой версии модели на первом из названных участков (см. рис. 5, а) кровля коренных пород оказалась на 10 м глубже, чем ожидалось ранее по данным ранее существовавших немногочисленных скважин, причем ее минимальная высотная отметка была очень близка к уровню верха сооружения. Поэтому инженеры сосредоточили следующие исследования с помощью инженерно-геологического бурения именно на этом участке. В результате на поверхности материнских пород было обнаружено глубокое узкое углубле-

ние поперек тоннеля совсем близко к его верхнему своду. В этом месте не было возможности изменить высотные отметки трассы тоннеля, поэтому конструкция его системы крепления, планы строительства и бюджет проекта были пересмотрены с учетом этих сложных грунтовых условий [5].

На втором из названных участков (см. рис. 5, б), толщина скального грунта над запланированным тоннелем согласно первой интерпретации геофизических данных была фактически нулевой, что побудило проектировщиков переместить трассу сооружения на несколько сотен метров западнее и сосредоточить последующее бурение инженерно-геологических скважин на новом месте. Но и обновленная модель показала наличие только 5 м скальных грунтов на некоторых участках перемещенной к западу трассы. Поэтому в конечном итоге трасса была опущена на 50 м вниз.

ОБСУЖДЕНИЕ ►

Помимо иллюстрации того, какие типы подземных структур можно определить с помощью воздушного геосканирования, четыре случая из практики, рассмотренные в настоящей статье, демонстрируют большой потенциал данного метода для крупных проектов по строительству тоннелей, особенно на ранних стадиях. Это связано с тем, что воздушное геосканирование позволяет быстро определять зоны с неблагоприятными грунтовыми условиями.

Еще одним большим преимуществом этого метода является возможность сбора данных в районах, заросших густым лесом (как это было при обнаружении крупных зон трещиноватости в целях уточнения трассы железнодорожного тоннеля в Норвегии для проекта FRE16), со снежным покровом или при ограниченном доступе (как это было при выявлении зон слабых грунтов в Индии).

Пример по определению мощности скальных грунтов над планируемым тоннелем в центральной части Норвегии наглядно продемонстрировал, как первоначально предложенное положение трассы сооружения на участке Фоссингельва было отклонено и исправлено вскоре после геосканирования. Это решение в конечном итоге привело к прямой экономии затрат на проект, поскольку потребовалось на 30% меньше буровых работ и на три месяца меньше времени на планирование [12].

Если плохих грунтовых условий избежать невозможно, то по-прежнему имеет большое значение более точное определение геологических рисков и затрат на строительство, как показали, например, рассмотренные ранее случаи по определению мощности скальных грунтов над планируемым тоннелем на участке Груббосен в центральной части Норвегии и по обнаружению крупных зон трещиноватости при уточнении трассы железнодорожного тоннеля в Норвегии для проекта FRE16.

Даже если результаты геосканирования не столь точны, выявление серьезных геологических изменений или зон риска помогает повысить эффективность последующих наземных исследований. Представленные в статье примеры по проектам в Индии это хорошо продемонстрировали. Хотя корреляция между значениями УЭС и прочностью пород там и была менее точна, полученные результаты во втором примере помогли выявить места с подозрительными изменениями УЭС, через которые проходила первоначально запланированная трасса тоннеля, и поэтому они были дополнительно исследованы. Знание размеров каждой зоны неблагоприятных грунтов также потенциально может помочь инженерам избежать бурения лишних скважин в одной и той же зоне УЭС, грунты в которой скорее всего обладают схожими свойствами.

Для рассмотренного ранее участка Груббосен в Центральной Норвегии первая модель коренных пород на основе данных геосканирования не отражала в точности мельчайшие детали узкой впадины в их кровле (см. рис. 5), но она правильно выявила потенциально опасную зону, требовавшую дополнительных исследований с помощью новых инженерно-геологических скважин.

Описанные в статье случаи из практики показали контраст в том, сколько достоверных данных наземных исследований было доступно для детальной количественной интерпретации. В примерах по индийским проектам было особенно трудно пробурить скважины из-за удаленности мест прохождения тоннеля и сложного рельефа, хотя там ранее были собраны некоторые разрозненные данные по образцам керна из скважин (но даже это может быть невозможно для некоторых проектов строительства тоннелей).

Представленные в настоящей статье результаты подчеркнули ценность использования аэрогеофизических методов изысканий в удаленных местах. При этом даже там, где было доступно большое количество данных бурения в дополнение к аэрогеофизическим материалам, как это было при определении мощности скальных грунтов над планируемым тоннелем в Центральной Норвегии, интеграция результатов исследований инженерно-геологических скважин с результатами использования передовых методов, таких как искусственные нейросети, открыла дополнительную ценность метода АЕМ и применения искусственного интеллекта.

Однако существуют ограничения в применимости воздушного геосканирования. Некоторые из них логистические, например доступность района изысканий. Хотя исследования с вертолета и могут охватывать многие территории, где невозможно применение наземных геофизических методов, но все же, например, в первом из рассмотренных ранее случаев по индийским проектам вертолет не мог маневрировать над самой крутой частью горного хребта. Городские районы также недоступны для вертолетных исследований по соображениям безопасности. К тому же для получения геологических моделей по данным электромагнитной съемки необходимо, чтобы расстояние до существующих (металлических) сооружений составляло около 100 м.

Некоторые ограничения также связаны с самим геофизическим методом. Геофизический контраст между целевой структурой и окружающей ее средой должен быть достаточно сильным, чтобы эту структуру можно было обнаружить с помощью прибора. Например, несмотря на то что при определении основных зон трещиноватости в Норвегии было обнаружено основное уязвимое место, возможно, существуют очень тонкие трещины или зоны, которые важны для инженеров-тоннелестроителей, но недостаточно велики для получения изображений с помощью воздушного геосканирования.

Разрешающая способность геофизического оборудования также является ограничением. Используемое конкретное устройство для электромагнитной съемки во временной области с вертолета обычно имеет разрешение по вертикали в несколько метров в приповерхностной зоне и только в десятки метров на глубине в несколько сотен метров от поверхности земли. Разрешение по горизонтали обычно составляет 30–100 м в зависимости от глубины от поверхности и от высоты полета над землей. Но все же интеграция достоверных результатов наземных исследований с геофизическими данными позволяет создавать геологические модели с точностью до нескольких метров. Об этом свидетельствуют как рассмотренная в статье оценка толщины скальных грунтов над будущим тоннелем в Центральной Норвегии, так и обратный анализ прошлых исследований с помощью геосканирования, представленный в более ранней публикации [8].

Несмотря на эти недостатки, приведенные в настоящей статье,

ясно показывают, что воздушное геосканирование может обеспечить значительную экономию затрат на крупномасштабные проекты строительства инфраструктуры в различных геологических средах по всему миру. Хотя этот метод и не может полностью устранить геологические риски, обширная информация, предоставляемая с его помощью на ранних стадиях, может внести значительный вклад в снижение этих рисков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Применение воздушного геосканирования на ранних или поздних стадиях развития проектов по строительству тоннелей позволяет получить ценную информацию об изучаемых территориях и выявить потенциальные зоны, для которых необходимы последующие уточняющие исследования. Четыре случая из практики, рассмотренные в статье, показали, что с помощью этого метода возможно обнаружение крупных зон трещиноватости, слабых грунтов и недостаточной мощности скальных пород над планируемым тоннелем. Его использование обеспечило улучшение планирования буровых работ, а также оптимизацию и перепроектирование трасс тоннелей и систем их крепления на более ранних этапах. Возможность решить эти проблемы как можно раньше (на этапе планирования, до осуществления крупных инвестиций) снижает риск перерасхода средств. И даже если проект находится на более поздней стадии развития или если изменений в положении трассы тоннеля невозможно избежать, более точная оценка затрат и геологических рисков по-прежнему важна для обеспечения финансово обоснованного и безопасного строительства. **И**

Эта статья посвящается памяти господина Санджива Малика, который ушел от нас из-за COVID-19 во время подготовки рукописи. Как исполнительный директор государственной индийской компании NHIDCL (Национальной корпорации развития автомобильных дорог и инфраструктуры) он мыслил дальновидно, проявлял живой интерес к методам электромагнитной съемки и к возможностям использования полученных с их помощью данных для крупных инфраструктурных проектов. Авторы знали господина Малика как очень умного, приятного и доброго человека. Его будет очень не хватать, и эта утрата тяжело ощущается всеми.

Авторы благодарны норвежской государственной компании Vape NOR (ответственной за владение, техническое обслуживание, эксплуатацию и разви-

тие железнодорожной инфраструктуры) за разрешение опубликовать результаты исследований по определению ос- новных зон трещиноватости в Норве-

гии и выражают особую благодарность А.Х. Финнёй, И.Л. Ульнесс и Х.Г. Хише за их помощь в подготовке инженерно- геологических данных.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Rasmussen A.H., Linares G.M., Christensen C.W., Malik S., Skurdal G.H., Pfaffhuber A.A. Airborne geoscanning as a site investigation tool in large-scale tunnelling projects: a synthesis of case studies from Norway and India // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 861. № 4. Rock Engineering Design. Article 042039. DOI 10.1088/1755-1315/861/4/042039. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/861/4/042039/meta>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

1. Beckers F., Chiara N., Flesch A., Maly J., Silva E., Stegemann U. A risk-management approach to a successful infrastructure project // McKinsey Working Papers on Risk. 2013. Vol. 52.
2. Pfaffhuber A.A., Grimstad E., Domaas U., Auken E., Foged N., Halkjaer M. Air-borne EM mapping of rockslides and tunneling hazards // Lead. Edge. 2010. Vol. 29. № 8. P. 956–959.
3. Okazaki K., Mogi T., Utsugi M., Ito Y., Kunishima H., Yamazaki T., Takahashi Y., Hashimoto T., Ymamaya Y., Ito H., et al. Airborne electromagnetic and magnetic surveys for long tunnel construction design // Phys. Chem. Earth. 2011. Vol. 36. P. 1237–1246.
4. Pfaffhuber A.A., Lysdahl A.O.K., Sormo E., Skurdal G.H., Thomassen T., Anschutz H., Scheibz J. Delineating hazardous material without touching – AEM mapping of Norwegian alum shale // First Break. 2017. Vol. 35. № 8. P. 59–39. DOI: 10.3997/1365-2397.35.8.89807.
5. Harrison E.J., Skurdal G.H., Christensen C.W., Pfaffhuber A.A., Lund A.K., Second B. Applying machine learning on airborne geophysical models to map bedrock topography and its lithological boundaries // ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2022 and 47th General Assembly Bella Center, 22–28 April 2022, Copenhagen (in review).
6. Christiansen A.V., Auken E., Sorensen K. Groundwater Geophysics (2nd edition, edited by R. Kirsch. Berlin: Springer, 2009. P. 179–226.
7. Lysdahl A.K., Andresen L., Voge M. Construction of bedrock topography from airborne-EM data by artificial neural network // 9th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NMGE 2018), 25–27 June 2018, Porto (extended abstract).
8. Pfaffhuber A.A., Lysdahl A.O., Christensen C., Voge M., Kjennbakken H., Mykland J. Large scale, efficient geotechnical soil investigations applying machine learning on airborne geophysical models // Proc. of the XVII European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1–6 September 2019, Reykjavik.
9. Silvestri S., Christensen C.W., Lysdahl A.O.K., Anschutz H., Pfaffhuber A.A., Viezzoli A. Peatland volume mapping over resistive substrates with airborne electromagnetic technology // Geophys. Res. Lett. 2019. Vol. 46. P. 6459–6468. URL: <https://doi.org/10.1029/2019GL083025>.
10. Z Morh Tunnel Geological Plan Layout with Geotechnical Investigation. Grusamar Ingenieria y Consulting, 2017. Drawing № DNDA/ADV/1029-Z MORH/2017/5_1, DNDA/ADV/1029-Z MORH/2017/5_2.
11. Z Morh Tunnel Geotechnical Longitudinal Profile. Grusamar Ingenieria y Consulting, 2017. Drawing № DNDA/ADV/1029-Z MORH/2017/6_2, DNDA/ADV/1029-Z MORH/2017/6_3.
12. Christensen C.W., Skurdal G.H., Pfaffhuber A.A., Ronning S., Lindgard A., Sellgren K.C. 2020. Airborne geoscanning and efficient geotechnical ground investigation workflows: A roadbuilding case study from Central Norway // 18th Nordic Geotechnical Meeting (Virtual Conf. NGM 2020), 18–19 January 2021, Helsinki (extended abstract).

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.

WWW.GEOINFO.RU