

А.И. Калашник, Д.А. Максимов

**ПОДХОДЫ К ЛОКАЛИЗАЦИИ СКРЫТЫХ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ В БОРТАХ
ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ***

Предложены новые для глубоких карьеров подходы локализации скрытых геологических разломов на основе георадарного профилирования и пассивного сейсмического мониторинга по методике SMTIP. Приводится информация о развитии и использовании георадарного профилирования сотрудниками Горного института КНЦ РАН как экспресс-метода обнаружения и локализации скрытых разломов в геологической среде и на горно-геологических объектах Кольского полуострова. Сформулирована возможность применения методики поверхностного малоапертурного микросейсмического мониторинга, разработанного в ФГАОУ ВПО БФУ им. И. Канта для мониторинга процесса трещинообразования при гидро-разрыве пласта, для обнаружения скрытых активных разломов в массиве пород, разрабатываемых глубокими карьерами.

Ключевые слова: глубокие карьеры, скрытые геологические разломы, георадарное профилирование, малоапертурный сейсмический мониторинг.

Тектонические разломы оказывают существенное влияние на безопасность открытых горных выработок, так как являются, с одной стороны, природными концентраторами напряжений и деформаций, а с другой – существенно снижают устойчивость скальных пород. Так же тела (заполнители) разломов зачастую обладают относительно низкими значениями физико-механических свойств. Поэтому проблема локализации разломов всегда актуальна при ведении горных работ и приобретает особо важное значение для глубоких карьеров в массивах скальных пород, для которых характерно изначально более высокое напряженное состояние.

В настоящее время наибольшее распространение получили методы локализации и изучения характеристик разлома, основанные на непосредственном доступе к нему. В случае, когда разлом выходит на дневную поверхность и/или вскрывается горными выработками, с доступом к телу разлома и соответствующим его изучением не возникает значительных проблем. Куда большие сложности воз-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по гранту № 15-29-06037 офи_м.

никают при наличии скрытых геологических разломов, то есть разломов, не выходящих на дневную поверхность и не подсеченными на данный момент горными разработками. Хотя такой разлом может оказывать даже большее влияние на безопасность горных работ, особенно если он неблагоприятно ориентирован по отношению к борту карьера и имеет низкие прочностные свойства по своим контактам. В таком случае безопасность борта карьера в значительной степени будет зависеть от своевременной локализации разлома, изучения его состояния и характеристик тела разлома.

Технически, хотя экономически и не оправдано, обнаружение и изучение скрытых разломов может производиться с помощью бурения регулярных геологических разведочных скважин по сетке с минимально возможным шагом. Естественно, бурение такой сетки скважин приведет к существенному росту капитальных затрат и, что также не маловажно, в последующем не лучшим образом скажется на устойчивости уступов. Дифференцированная система геологических разведочных работ, основанная на предварительных геологических данных и геологической разведки, может несколько уменьшить и капитальные затраты, и негативное влияние на устойчивость. С учетом знания предварительных геологических данных и геологической разведки возможно создание системы геомеханического мониторинга, с помощью которой также возможно локализовать скрытые разломы [5].

Одним из методов получения информации (предварительных геологических данных) о внутреннем строении и состоянии массива пород может служить георадарное зондирование, основанное на использовании электромагнитных волн, «просвечивающих» массив пород. В случае с карьером георадарное зондирование может применяться как на территории вокруг карьера, так и непосредственно на его уступах [6].

На начальных этапах работы карьера, а также при его расширении и углублении, представляется целесообразным использование георадарного подповерхностного зондирования в комплексе геологических работ, направленных на изучение строения месторождения и вмещающего его массива пород. Определенным аналогом такого комплексирования работ может служить идентификация и изучение разлома Беломорского геоблока [8].

На рис. 1 изображен фрагмент карты с выделением сотрудниками Геологического института КНЦ РАН под руководством Николаевой С.Б. на основании дешифрирования космо- и аэроснимков предполагаемых линеаментов разрывной природы. Для подтверждения

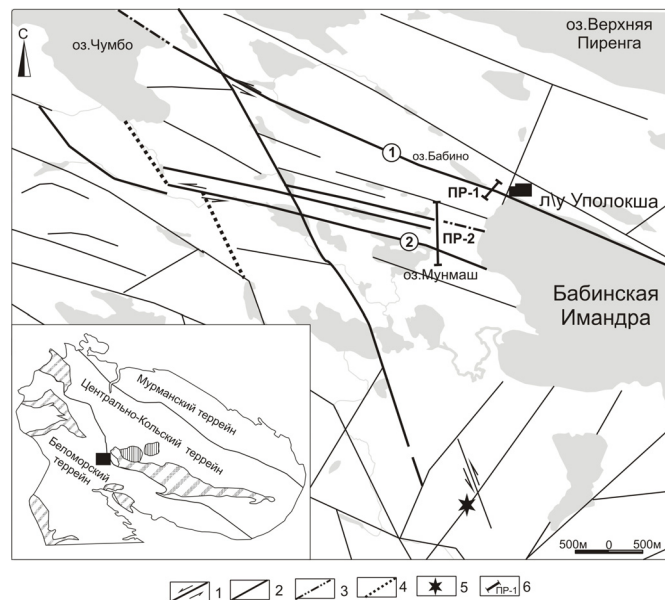


Рис. 1. Площадка проведения комплексных геологических и георадарных исследований [8]: 1—4 – линеаменты, выделенные по дешифрированию аэрофотоснимков и космокарты: 1 – разрывной природы, в пределах которых установлены признаки сдвига, 2 – влияющие на голоценовые ландшафтные комплексы, 3 – прочие, в том числе трещинной природы, опоясывающие новейшие свдиги, 4 – древние ложбины стока; 5 – крупные палеосейсмодислокации в скальных породах, 6 – георадарные профили. Цифрами в кружочках указаны линеаменты, упоминаемые в тексте.

наличия данных линеаментов, а так же получения данных о пространственном расположении разломов, глубине их залегания, угле падения и других параметрах на выбранной площадке авторами было проведено георадарное профилирование по профилям ПР-1 и ПР-2.

На рис. 2 (см. Приложение, с. 450) представлена радарограмма по профилю ПР-2, полученная с помощью георадарного комплекса ЛОЗА-1Н, позволяющего производить зондирование на глубину до 300 метров. На радарограмме четко выделяется линейная структура (черная линия) в скальном основании, которая предположительно и является скрытым разломом. Подтвердить или опровергнуть то, что обнаруженная структура является разломом, а так же изучить физико-механические свойства данного объекта можно на основании проходки разведочных скважин или иных выработок.

Таким образом, дешифрирование аэрофотоматериалов и космоснимков с выделением линеаментов и дальнейшее георадар-

ное исследование данных объектов позволяет получать предварительные геологические данные о строении массива пород на глубину до первых сотен метров. Так же георадарное зондирование позволяет получать предварительные данные о расположении и геометрии обнаруженных объектов, что может быть использовано при дальнейших геологических изысканиях.

В то же время следует отметить, что результативное георадарное зондирование ограничено по глубине, составляя на сегодняшний день, при использовании комплекса «ЛОЗА-1Н», около 300м. Это ограничение может быть в определенной степени компенсировано при использовании георадаров не только на дневной поверхности, но и на уступах глубоких карьеров, что позволяет достичь больших глубин в абсолютном выражении.

Георадарные комплексы, как правило, имеют относительно небольшие габаритные размеры и вес, что позволяет использовать их не только на горизонтальных и субгоризонтальных поверхностях, но и на поверхностях, имеющих разные углы наклона, вплоть до вертикальных. Примером использования данного преимущества могут служить измерения, проведенные на уступах карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» [4].

На рис. 3 представлен идентифицированный по данным георадарной съемки скрытый геологический разлом, подсекающий определенным образом борт карьера. Отображенный на рисунке разлом прослежен не по всей его глубине в связи с ограниченностью георадарных измерений по глубине зондирования, но выявленный угол падения позволяет экстраполировать продолжение разлома в глубь массива пород.

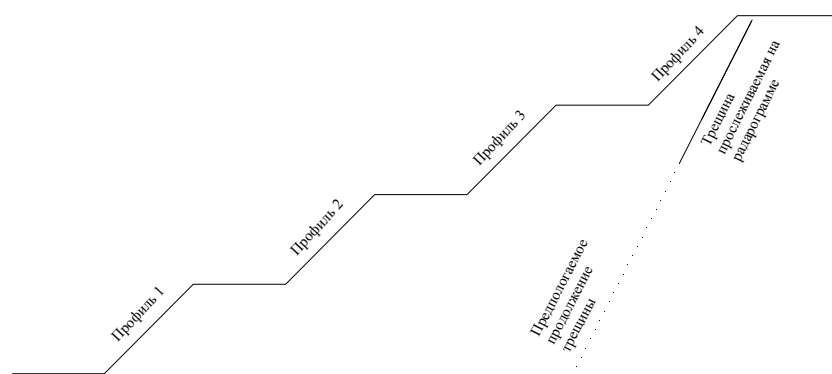


Рис. 3. Схема георадарных профилей [4]

С развитием промышленных технологий создаются георадары с большей глубиной зондирования, а так же современные автоматизированные технологии обработки георадарных данных, позволяющие получить более достоверные сведения о структуре массива пород, и тем самым предоставляется возможность применить георадары для выявления и локализации скрытых нарушений геологической среды. Для заверки георадарных данных может применяться точечное скважинное бурение. Примером могут служить более поздние работы, проведённые Горным институтом КНЦ РАН на карьере Железный ОАО «Ковдорский ГОК» [6, 7].

В качестве еще одного методического подхода к обнаружению скрытых тектонических разломов можно рассмотреть метод пассивного сейсмического мониторинга [2].

В настоящее время в горном деле использование пассивного сейсмического мониторинга в основном связано с установкой сейсмоматчиков в скважинах. Это обуславливает использование данного метода не на начальных этапах строительства и проектирования карьера, а уже в ходе его длительной эксплуатации. Так же скважинный метод сейсмического мониторинга делает этот метод относительно капиталоемким. Для пассивного мониторинга на проектной стадии или ранних стадиях разработки карьеров целесообразно использовать новые методики, получившие развитие в нефтегазовой сфере.

Пассивный сейсмический мониторинг на нефтегазовых объектах получил широкое распространение в связи с активным использованием метода гидравлического разрыва пласта (ГРП). Метод ГРП активно используется при добыче природного газа из сланцевых пород, характеризующихся низкой пропускной способностью. Для увеличения газоотдачи продуктивного сланцевого пласта в него закачивается специальный раствор под значительным давлением, что приводит к трещинообразованию и разрушению пласта. Получившиеся трещины служат каналами выхода природного газа из пласта в добывающую скважину, что означает локальную интенсификацию газоотдачи пласта. Данный процесс сопряжен с рядом проблем. Бесконтрольный процесс трещинообразования может привести к появлению магистральных трещин, выходящих за пределы коллектора, по которым природный газ начинает утекать из газоносного пласта в смежный массив пород и окружающую среду. Это приводит к значительным экологическим проблемам (загрязнение почв и водоемов). В связи с вышесказанным, понятно особое внимание, уделяемое мониторингу и контролю процессов трещинообразования в массиве. Одним из основных методов мониторинга при ГРП является метод пассивного сейсмического мониторинга [3].

Большинство методов пассивного сейсмического мониторинга на нефтегазовых объектах сопряжены с необходимостью проходки скважин, в которых и размещаются сейсмические датчики, что делает этот метод крайне затратным. В последние несколько десятков лет получили развитие методы пассивного сейсмического мониторинга, не обладающие подобными недостатками. К ним можно отнести поверхностный малоапертурный микросейсмический мониторинг Seismic Moment Tensor Inverse Problem (SMTIP), разработанной БФУ им. И. Канта совместно с ООО «Антел-нефть» [3].

Пример размещения датчиков системы SMTIP приведен на рис. 4 [1]. Как видно из рисунка, глубина контролируемого участка массива горных пород по глубине составляет порядка 2500 метров, что позволяет на сегодняшний день говорить о полном охвате возможных глубин ведения открытых горных работ. В плане же область размещения эмиссии и, соответственно, область определения очагов сейсмической эмиссии имеет диаметр не выше 1000 метров, что не всегда позволяет охватывать необходимую площадь. Но данная проблема может быть скомпенсирована мобильностью системы.

На наш взгляд, технология SMTIP поверхностного микросейсмического мониторинга применительно к глубоким карьерам может позволить решать следующие задачи:

- локализация гипоцентров микросейсмических событий, отслеживание раскрытия и подвижек по разломам;
- выявление скрытых геологических разломов, зон повышенной трещиноватости;
- определение структурно-тектонических особенностей участков бортов карьера;
- анализ интенсивности излучения микросейсмической энергии при ведении буровзрывных работ;
- микросейсмический мониторинг при ведении горных работ.

Вместе с тем видится, что одним из основных недостатков данной системы является необходимость размещения поверхностных датчиков по определенной сетке, что не всегда возможно достичь на рабочих уступах карьера. Однако непосредственно в период подготовки площадки при планировании и строительстве карьера практически очищаются значительные площади, что, на наш взгляд, позволяет эффективно использовать технологию SMTIP для получения первичной геологической информации о структуре и состоянии эксплуатируемого массива горных пород. Применение технологии SMTIP также эффективно будет на определенных этапах ведения открытых горных работ, прежде всего, при постановке борта карьера в конечное положение.

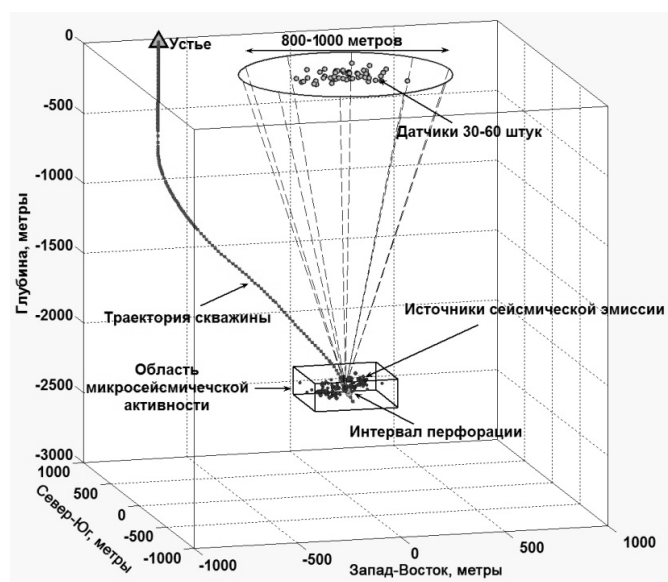


Рис. 4. Схема наблюдения наземного микросейсмического мониторинга [1]

Заклучение

Проведенный анализ показывает, что георадарное зондирование и пассивный сейсмический мониторинг, как скважинный, так и поверхностный, по технологии SMTIP, являются перспективными методами идентификации скрытых геологических разломов в массивах горных пород, включая ведение открытых горных работ и, особенно, для глубоких карьеров. Представляется, что рассмотренные методы могут в определенной степени эффективно применяться в комплексе. Так, георадарное зондирование позволяет идентифицировать и локализовать структурные неоднородности на глубинах от первых метров до 200–300 м от дневной поверхности, с получением информации о геометрии, простирации и угле залегания разлома или зоны повышенной трещиноватости. Пассивный сейсмический мониторинг позволяет идентифицировать активные геологические разломы на глубине порядка 2500 метров и охарактеризовать интенсивность происходящих процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортников П.Б., Майнагашев С.М. Обратные задачи микросейсмического мониторинга // В сборнике информационные технологии и обрат-

ные задачи рационального природопользования. Ханты-Мансийск, 2005. с. 79–83.

2. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия // [Опарин В.Н. и др.] Отв. ред. Мельников Н.Н.; Рос. Акад. Наук, сиб. Отд-ние, Ин-т горного дела [и др.] – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 632 с.

3. Гапеев Д.Н., Ерохин Г.Н., Родин С.В., Седайкин Р.Д., Сисембаев К.Д., Смирнов И.И. Новые возможности применения пассивного микросейсмического мониторинга для выявления структурно-тектонических особенностей участков нефтегазовых месторождений // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Калининград, 2014. с. 113–120.

4. Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Демахин А.Ю. Подповерхностное георадарное зондирование горно-геологических сред Кольского полуострова // Вестник МГТУ. Тр. Мурман. гос. тех. университета, 2009. Т. 12. № 4. С. 576–583.

5. Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Демахин А.Ю. Георадарные определения подповерхностной структуры пород Хибинского и Ковдорского горнорудных районов // Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции «Комплексные геолого-геофизические модели древних шитов». Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН. 2009. с. 227–230.

6. Калашник А. И., Казачков С. В., Сохарев В. А., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю. Выявление дислокаций в скальных горнотехнических конструкциях // Вестник МГТУ: Науч. тр. Мурманского ГТУ. 2013. Т. 16. № 1. с. 93–97.

7. Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Казачков С.В., Сохарев В.А. Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. – 2014. – № 4. – С.60–64.

8. Максимов Д.А., Толстобров Д.С. Георадарное зондирование в комплексе геологических исследований осадочных отложений Беломорского геоблока // Труды 6-ой школы молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых». Апатиты. 2015. (В печати). **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Калашник Анатолий Ильич – кандидат технических наук, зав. лаборатории Геофлюидомеханики,

Максимов Дмитрий Анатольевич – младший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук.



UDC 622.271.333:551.24(470.21)

APPROACHES FOR LOCALIZING HIDDEN GEOLOGICAL FAULTS IN DEEP OPEN-PITS' WALLS

Kalashnik A.I., Head of laboratory of geofluid mechanics, Ph.D (Eng.), Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia,
Maksimov D.A., junior researcher, Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia.

This paper presents new approaches for localizing hidden geological faults based on georadar surveys and passive seismic monitoring by SMTIP method. Information is given on improving and using georadar survey methods by MI KSC RAS employers as an express method for identifying and localizing hidden geological faults in geological mass and mining objects of the Kola Peninsula. Possible application of the surface small-aperture seismic monitoring developed in Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU) has been substantiated in order to monitor fracturing process at hydrofracturing and discover active hidden faults in the rock mass developed with deep open-pit mining.

Key words: deep open-pits, hidden geological faults, georadar survey, small-aperture seismic monitoring.

REFERENCES

1. Bortnikov P. B., Majnagashev S. M. *Obratnye zadachi mikrosejsmicheskogo monitoringa* (Inverse problem of microseismic monitoring) // V sbornike informacionnye tehnologii i obratnye zadachi racional'nogo prirodopol'zovanija. Hanty-Mansijsk, 2005. Pp. 79–83.
2. *Destrukcija zemnoj kory i processy samoorganizacii v oblastjah sil'nogo tehnogenogo vozdejstvija* (The destruction of the earth's crust and the processes of self-organization in the areas of strong anthropogenic impact) // [Oparin V.N. i dr.] Otv. red. Mel'nikov N.N.; Ros. Akad. Nauk, sib. Otd-nie, In-t gornogo dela [i dr.]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012. 632 p.
3. Gapeev D.N., Erohin G.N., Rodin S.V., Sedajkin R.D., Sisembaev K.D., Smirnov I.I. *Novye vozmozhnosti primenenija passivnogo mikrosejsmicheskogo monitoringa dlja vyjavlenija strukturno-tektonicheskikh osobennostej uchastkov neftegazovykh mestorozhdenij* (New possibilities of application of passive microseismic monitoring to identify structural and tectonic features areas of oil and gas deposits) // Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Kaliningrad, 2014. pp. 113–120.
4. Kalashnik A.I., Zaporozhec D.V., D'jakov A.Ju., Demahin A.Ju. *Podpoverhnostnoe georadarnoe zondirovanie gorno-geologicheskikh sred Kol'skogo poluostrova* (Subsurface GPR sensing geological environments of the Kola Peninsula) // Vestnik MGTU. Tr. Murman. gos. teh. universiteta, 2009. V. 12. No 4. pp. 576–583.
5. Kalashnik A.I., Zaporozhec D.V., D'jakov A.Ju., Demahin A.Ju. *Georadarnye opredelenija podpoverhnostnoj struktury porod Hibinskogo i Kovdorskogo gornorudnykh rajonov* (GPR Demagin determine the subsurface structure of rocks of Khibiny and Kovdor mining areas) // Trudy Vserossijskoj (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchnoj konferencii «Kompleksnye geologo-geofizicheskie modeli drevnih shhitov». Apatity: Geologicheskij institut KNC RAN. 2009. pp. 227–230.
6. Kalashnik A. I., Kazachkov S. V., Soharev V. A., Zaporozhec D. V., D'jakov A. Ju. *Vyjavlenie dislokacij v skal'nykh gornotekhnicheskikh konstrukcijah* (Identification of dislocations in rock mining constructions) // Vestnik MGTU: Nauch. tr. Murmanskogo GTU. 2013. V. 16. No 1. pp. 93–97.
7. Kalashnik A.I., Zaporozhec D.V., D'jakov A.Ju., Kazachkov S.V., Soharev V.A. *Issledovanija georadarami struktury i tekushhego sostojanija gornyx porod, slagajushhih ustupy osnovnogo kar'era Kovdorskogo GOKa* (Study of the structure and current state of the rocks, forming ledges of the main pit of Kovdorskiy GOK) // Gornyj zhurnal. 2014. No 4. pp. 60–64.
8. Maksimov D.A., Tolstobrov D.S. *Georadarnoe zondirovanie v komplekse geologicheskikh issledovanij osadochnykh otlozhenij Belomorskogo geobloka* (Ground penetration Radar in complex geological studies of the sediment, the Belomorian megablock) // Trudy 6-oj shkoly molodykh uchenykh «Geotehnologija i obogashhenie poleznykh iskopaemykh». Apatity. 2015. (V pečati)