

УДК 622.243

АНАЛИЗ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БУРЕНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН НА ТАЛНАХСКОМ РУДНОМ УЗЛЕ

Нескоромных Вячеслав Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: sovair@bk.ru

Неверов Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент каф. бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: neveroff_man@mail.ru

Рожков Владимир Павлович,

д-р техн. наук, профессор каф. бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Каратаев Дмитрий Давидович,

начальник производственно-технологического отдела, ООО «Норильскгеология», Россия, 663330, г. Норильск, а/я 889.
E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Неверов Александр Александрович,

магистрант каф. технической физики Института космических исследований и высоких технологий ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», Россия, 660014, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: aaneverov@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью бурения геологоразведочных скважин для осуществления поисков богатых медно-никелевых руд на глубоких горизонтах и флангах Талнахского рудного узла.

Цель работы: анализ геолого-технических условий бурения глубоких скважин на Талнахском рудном узле, аналитические исследования образцов горных пород для последующей разработки технологии строительства скважин с применением комплексов со съемными керноприемными трубами.

Методы исследования: визуальное описание керна, аналитические исследования с применением методов рентген-флуоресцентной спектromетрии, электронной микроскопии, рентгеноспектрального, спектроскопического и томографического анализа для определения минерального состава глинистых горных пород; лабораторные тестовые испытания образцов хлоритизированных горных пород; расчеты потерь давления при бурении КССК с полимерными растворами.

Результаты. Анализ и исследование геологического материала Талнахского рудного узла показали, что неустойчивость стенок скважин связана с напряженным состоянием горного массива и со специфическим минеральным составом материалов, заполняющих трещины рудных зон и слагающих стенки скважин в осадочных толщах. Аналитические исследования показали, что образцы горных пород представляют пористую смесь (0,1–5 мкм) кристаллических и аморфных минералов. Разрушение аргиллитов и обрушение габбро-долеритов при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе связано с их минеральным составом, в частности с наличием хлорита и монтмориллонита. Вода проникает в микропоры и микротрещины, способствуя раскрытию трещин, гидратации глинистых минералов с образованием площадок скольжения и, как следствие, приводит к разрушению. Расчет потерь давления показал, что необходимо разрабатывать алмазные коронки с наружным диаметром 80–82 мм для бурения комплексами КССК в сложных горно-геологических условиях Талнахского рудного узла.

Ключевые слова:

Геологический материал, глинистый минерал, хлорит, габбро-долерит, устойчивость стенок скважины, напряженное состояние горного массива, потери давления.

Введение

В месторождениях Норильского района сосредоточены запасы никеля, сопоставимые с районом Садбери; при этом Норильск и Садбери далеко превосходят все другие месторождения и рудные районы. Кроме того, Норильские месторождения содержат огромные запасы элементов платиновой группы (ЭПГ), уступая лишь месторождениям Бушвельдского комплекса и, возможно, Великой Дайке Зимбабве. Это делает их уникальными: они являются важным источником и никеля, и ЭПГ (а также меди и кобальта), а не одного из названных металлов. Очень важно также, что Норильские месторождения превосходят все другие (и медно-никелевые, и платино-металльные) по стоимости тонны руды. Огромные запасы Норильского района сосредоточены, в основном, в Талнахском рудном узле (ТРУ), на площади 8×18 км, по сравнению с площадью Садбери 30×60 км и Бушвельда 280×450 км [1].

Интенсивная эксплуатация сульфидных платино-медно-никелевых руд месторождений Норильского рудного района и, прежде всего, богатых сульфидных руд привела к существенному изменению качественного состава рудного сырья, поступающего на обогатительно-металлургическую переработку. Именно ускоренное выбывание богатых сульфидных руд приводит к росту относительной доли бедных и труднообогатимых типов руд. Подобное диспропорционирование качества рудного сырья обуславливает появление в числе особо актуальных научно-технических задач получение наиболее полных данных по качеству рудного сырья, способных существенно повлиять на показатели извлечения промышленных компонентов, особенно – благородных металлов [2]. Выполненное изучение руд месторождения Норильск I выдвигает новую весьма актуальную задачу по исследованию особенностей состояний ЭПГ и их распределения в аналогичных рудах Талнахского рудного поля.

Актуальность этого определяется, прежде всего, тем, что запасы ЭПГ в Талнахском интрузиве огромны. Однако при традиционных подходах к экономической оценке этих руд в ряде случаев высказываются соображения о неэффективности их разработки в современных условиях. Задача становится тем более актуальной, поскольку выбор направлений дальнейшего развития (или неразвития) рудников Талнахского рудного поля является проблемой, требующей сегодняшнего решения. Вместе с тем проблема эффективного использования вкрапленных руд Талнаха на основе имеющихся данных представляется не столь очевидной по сравнению с месторождением Норильск I. Талнахские вкрапленные руды несколько беднее по содержаниям суммы ЭПГ. Допущение их потерь при традиционном обогащении действительно может сделать эти руды нерентабельными. Возможным решением проблемы может стать переоконтуривание рудных тел на основе параметров их пла-

тиносности и эффективности извлечения различных форм нахождения ЭПГ.

Переоконтуривание и поиски богатых медно-никелевых руд на глубоких горизонтах и флангах ТРУ осуществляется посредством бурения геолого-разведочных скважин глубиной более 1500 м. При бурении скважин возникают проблемы, связанные с поддержанием стенок скважин в устойчивом состоянии. Поддержание устойчивости стенок скважины является одной из основных задач, которые приходится решать при бурении глубоких скважин. Различные формы неустойчивости ствола, возникающей в результате взаимодействия между буровым раствором и глинистыми формациями, обязательно связаны с явлениями гидратации [3].

Целью данной работы является анализ геолого-технических условий бурения глубоких скважин на ТРУ для последующей разработки технологии строительства скважин.

Геологические особенности Талнахского рудного узла

Территория Талнахского рудного узла хорошо изучена по вопросам геологического строения [4–10] до глубин порядка 1000–1500 м и на большей части ограничена девонским уровнем. В геологическом строении территории принимают участие осадочные отложения, характеризующие лагунно-морские, континентальные и переходные между ними обстановки осадконакопления, широким распространением пользуются магматические образования эксплозивной, эффузивной и интрузивной фаций траппов. В геологическом разрезе выделяются три самостоятельные литологические толщи пород: туфолавовый комплекс пермо-триаса, глинисто-песчаные угленосные отложения пермо-карбона (тунгусская серия пород) и глинисто-карбонатные, сульфатно-карбонатные отложения морского палеозоя (ордовик-силур-девон), в кровле которых отмечается крупный предтунгусский размыв.

Талнахский рудоносный интрузив располагается в толщах пород морского и лагунно-континентального палеозоя. Рудовмещающие горизонты Талнахского рудного узла слагают юго-западный фланг Хараелахской мульды, рассеченной с севера на юг Норильско-Хараелахским разломом – основной рудоконтролирующей структурой района. К востоку от разлома породы характеризуются относительно спокойным залеганием. К западу от разлома породы геологического разреза вовлечены в интенсивную тектонику, обусловленную преимущественной разрядкой напряжений в условиях стресса северо-западного направления, в полосе шириной 5–7 км тектоно-магматической грабен-синклинали. Грабен-синклиналь образована серией западных сбросов, ориентированных вдоль Главного шва Норильско-Хараелахского разлома и наклоненных в его сторону под углом 40–60°. Наряду с крупными субмеридиональными сбросами на площади широко развиты более мелкие дизъюнктивные нарушения северо-западного прости-

рания и амплитудой смещения в пределах первых десятков метров. Сочетание сбросовых структур формирует сложное мозаично-блоковое строение геологического плана площади с образованием клиновидных бескерновых просядочных структур, совпадающих в плане с положительными пликативными структурами и крупными интрузивными телами.

Таким образом, просядочные структуры являются следствием гравитационной разрядки в зонах растяжения над сводовыми частями поднятий. Талнахский рудный узел включает Талнахское и Октябрьское месторождения, которые связаны с крупной дифференцированной интрузией габбро-долеритов. Сульфидное оруденение приурочено к низам интрузии и представлено тремя видами руд: сплошных, вкрапленных и прожилково-вкрапленных в породах, вмещающих интрузию («медистые») [11]. По преобладающему минералу различают пирротиновые, халькопиритовые (с талнахитом и моихукитом), кубанитовые и борнитовые (с халькозинном) руды. Сплошные руды образуют больше десятка пологопадающих линзо- и пластообразных залежей мощностью до 50 м. Они локализируются по нижнему контакту интрузии, реже в ее приподошвенной части или в подстилающих породах. Форма залежей относительно простая, осложненная мелкими сбросами или послойным расщеплением на флангах. Контакты сплошных руд обычно четкие, относительно ровные в кровле и осложненные апофизами и прожилками в почве. Прочность связи по контакту с метаморфизованными осадочными породами довольно значительна, контакт с габбро-долеритами нередко ослаблен хлоритовой зоной мощностью 3–10 см. «Медистые» руды образуют многочисленные относительно небольшие тела с прихотливыми очертаниями в плане и с резко меняющейся мощностью, достигающей 40 м. Они расположены над или под сплошными рудами, в измененных осадочных породах, иногда выше интрузии. Контакты нерезкие, неровные, прочные; со сплошными рудами и вмещающими породами граница четкая, нередко ослабленная присутствием хлорита.

Для ТРУ характерно интенсивное проявление разрывной тектоники различных порядков и связанной с этим трещиноватости. Наиболее трещиноваты рассланцованные породы тунгусской серии, наименее – толстоплитчатые карбонаты девона. Ниже отметки 700 м руды и породы отнесены к удароопасным. По степени трещиноватости руды и породы ТРУ делятся на четыре категории от слабо-трещиноватых до раздробленных, характеризующихся средним размером ребра элементарного блока от $\leq 0,2$ до $\leq 0,05$ м. В осадочных породах чаще всего встречаются пологие трещины, в сплошных рудах крутопадающие. Трещины чаще всего заполнены глинистыми минералами типа хлорита, гидрослюд, смешанослойными образованиями. С приближением к структурному нарушению трещиноватость пород увеличивается, образуя зо-

ну повышенной трещиноватости шириной равной 0,2–0,5 амплитуды смещения по данному разлому. Как правило, такие зоны ассиметричны: мощность зоны в висячем боку нарушения в 3–8 раз больше, чем в лежащем. Зоны высокой или повышенной трещиноватости мощностью до 5 м отмечены в кровле и реже в почве сплошных руд [12].

Методика аналитических исследований образцов горных пород

Для уточнения вещественного состава осадочных горных пород были отобраны 29 образцов керна аргиллита и хлорита с 5 скважин (ЗФ-53, ЗФ-56, ЗФ-48, РТ-11, РТ-17), глубина отбора 886–1565 м. Исследование вещественного состава и строения пород разведочной свиты и тунгусской серии проводилось в КНЦ СО РАН и Институте горного дела, геологии и геотехнологий СФУ. Определение элементного состава проводилось на рентген-флюоресцентном спектрометре BRUKER S2 Ranger (детектируемые элементы с Na до U). Электронно-микроскопическое изучение и микроанализ выполнены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM3000 с рентгеноспектральным анализатором BRUKER XFlash 430 H (детектируемые элементы от В до Am). Порошковые дифрактограммы образцов были сняты на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (линейный детектор VANTEC, Cu–K α излучение). Микроскопические исследования в проходящем свете выполнены с использованием микроскопа Axioskop 40 A Pol. Спектроскопический и томографический анализы были выполнены с помощью ЯМР микро-томографа на основе Bruker AVANCE DPX 200. Для получения спектров по ядрам ^1H и томографических изображений образцы распиливались сухим пилением до параллелепипедов нужных размеров (20×20×30 мм). Для исследований взаимодействия с водой образцы помещались вертикально в контейнер с дистиллированной водой с глубиной погружения 3 мм.

Визуальные исследования отобранных образцов горных пород

Разведочная свита (D_1 rz) с незначительным размывом залегает на подстилающих породах и представлена чередованием пачек фосфоритовых черных, серых, зеленовато-серых и коричневатых (до шоколадных) аргиллитов с линзами черных доломитов и известняков, включениями фосфоритов. В основании полимиктовые песчаники. Мощность свиты 40–250 м.

Тунгусская серия (C_2 – P_2) объединяет достаточно мощную толщу верхнепалеозойских угленосных отложений, с угловым и стратиграфическим несогласием залегающую на образованиях морского палеозоя и подстилающую вулканогенно-осадочный комплекс пермо-триаса. По совокупности органических остатков и вещественному составу тунгусская серия подразделяется на шесть свит: адылканскую и талнахскую, объединяемые по сте-

пени угленасыщенности в непродуктивную (слабоугленосную) толщу, и далдыканскую, шмидтинскую, кайерканскую, амбарнинскую продуктивную (угленосную) толщу. Адылканская свита представлена переслаивающимися алевролитами, аргиллитами, песчаниками с прослоями угля и конгломератов; отложения амбарнинской свиты содержат существенное количество туфогенного материала. В интервале глубин, соответствующем глубине залегания изучаемых отложений, естественная обводненность практически отсутствует, что подтверждено бурением многочисленных скважин и особенно проходкой горных выработок на медно-никелевых месторождениях Норильска и Талнаха.

Визуальный осмотр образцов разведочной свиты показал следующее:

- 1) Аргиллиты (шоколадно-коричневого, зеленовато-серого, пепельно-серого и серого цветов), метаморфизованные с многочисленными зеркалами и бороздами скольжения. Трещиноватость открытого типа, преимущественно под углом 20–30° к горизонту. Стенки трещин неровные, бугристые с корочками белого ангидрита и плёнками хлорита и серпентин-хлоритового материала. Встречаются единичные волосовидные прожилки того же состава субвертикального направления и единичные прожилки розоватого ангидрита, ориентированные под углом 10–15° к горизонту мощностью 2–3 мм. Контакт с нижележащими породами резкий по трещине под углом 50–60°, линия контакта волнистая. Наблюдается множество зеркал и борозд скольжения;
- 2) Долериты зелёного, зеленовато-серого, серого до тёмно-серого, тонко-зернистого, брекчиевидного облика изменены, хлоритизированы. В верхней части слоя отмечаются редкие мелкие (1–5 мм) миндалины, преимущественно округлой и овальной формы, заполненные белым кварцем в хлоритовой оторочке. Трещиноватость сильная. Преобладают трещины закрытого типа. Порода пронизана множеством прожилков различного направления. Мощность их от волосовидных до 1–1,5 см. Часто трещины взаимно пересекаются, и порода приобретает брекчированную текстуру. Преобладают трещины под углом 70–80° к горизонту. Выполнены они белым кварцем, часто с мелкими обломками вмещающих пород. По периферии вдоль трещин порода более изменена, осветлена.

Визуальный осмотр образцов тунгусской серии показал следующее:

- 1) алевролиты от серого до пепельно-серого цвета метаморфизованные, тонко-плитчатые, хлоритизированные, сланцеватые. По напластованию плиток отмечаются мелкие плохо сохранившиеся отпечатки флоры, мелкие чешуйки слюды и мелкая вкрапленность пирита. В верхней части слоя мощностью 10 см каменный уголь чёрный блестящий представлен тремя

плитками мощностью 2,0–2,5 см. Трещиноватость сильная, керн представлен мелкими оскольчатыми обломками. Переход к нижележащим породам резкий;

- 2) аргиллиты углистые чёрного цвета тонкоплитчатые с обилием отпечатков обуглившегося детрита. Встречаются редкие гнёзда пирит-марказита округлой формы размером до 1,5 см в диаметре. Породы метаморфизованные с множеством зеркал скольжения. Трещиноватость пород весьма сильная, трещины открытого типа. Переход к нижележащим породам постепенный;
- 3) долериты тёмно-серого цвета, тонкозернистые интенсивно-трещиноватые. Керн представлен обломками в виде щебня и дресвы, значительно реже – столбиками размером 5–7 см. В столбиках отмечаются ломаные волосовидные прожилки белого кальцита. По стенкам трещин открытого типа отмечаются плёнки серпентин-хлоритового материала, корочки белого кальцита, а также зеркала и борозды скольжения. К трещинам приурочена вкрапленность пирита в виде примазок, тонких (1–2 мм) прожилков. Значительно реже вкрапленность пирита отмечается в основной массе в виде гнёзд округлой формы размером до 1 см в диаметре. Контакт с нижележащими породами резкий, линия контакта разбурена в процессе бурения.

Визуальный осмотр образцов рудной зоны показал следующее:

- 1) Габбро-долериты такситовые тёмно-серого цвета с зеленоватым оттенком мелко- и среднезернистые изменены, перематы, хлоритизированы. Сульфидное оруденение (пирротин, халькопирит) преимущественно в виде гнёзд неправильной формы размером до 1,5–2,0 см в поперечнике. Значительно редко встречаются гнёзда округлой формы с чётким разделением на халькопиритовые и пирротиновые разности. Оруденение составляет примерно 10–15 % объёма породы. Трещиноватость пород сильная, различного направления. Преобладают трещины открытого типа, по стенкам которых отмечается серпентин-хлоритовый материал и молочно-белый кальцит. Отмечаются зеркала и борозды скольжения. Керн представлен столбиками длиной 3–5 см и редко столбиками мощностью 10–15 см. Переход к нижележащим породам резкий.
- 2) Габбро-долериты контактовые тёмно-серого цвета тонко- и мелкозернистые, массивной текстуры. Сульфидная вкрапленность сравнительно редкая в виде мелких гнёзд неправильной формы размером до 1 см. Единичные, округлой формы, достигают 2,5 см в диаметре. Встречаются ксенолиты вмещающих пород. Трещиноватость пород сильная, различного направления. Преобладают трещины открытого типа с плёнками серпентин-хлоритового материала. Единичные трещины выполнены молочно-бе-

лым кальцитом. Отмечаются зеркала и борозды скольжения. Контакт с нижележащими породами резкий. Линия контакта истёрта в процессе бурения.

Аналитические исследования отобранных образцов горных пород

В табл. 1 представлены результаты исследования отобранных образцов горных пород.

Таблица 1. Минеральный состав изученных образцов по результатам рентгенфлуоресцентного и рентгенофазового анализа

Table 1. Mineral composition of the samples by the results of X-ray fluorescence and X-ray phase analyses

№ образца/Глубина отбора, м Sample/Sampling depth, m	Содержание минералов, % Mineral content, %								Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
	Кальцит Calcite	Кварц Quartz	Мусковит Mirror stone	Шамозит* Chamosite	Пирит Pyrite	Доломит Dolomite	Анортит Anorthite		
6/1016	0	27,6	64,2	6,3	0	0	1,8	2,783	
9/886	2,1	26,5	64,4	5,6	0	0	0,6	2,778	
10/898	0	8,3	63,9	3,4	0	20,8	2,5	2,845	
12/927	0	21,1	59,8	11,7	0,96	0	6,4	2,843	
13/949	0	19,3	57,8	19,3	0,17	0	3,4	2,84	
14/954	0	17,6	66,4	13,2	0,63	0	2,2	2,836	
15/962	0	13,9	77	7,2	0,65	0	1,3	2,812	
18/1095	0,16	25,3	50,8	14,1	0	0	9,6	2,798	
20/989	5,38	21,5	65,3	6	0,41		1,5	2,807	
21/996	0,61	43	38,3	6,5	0	0	11,5	2,757	

Примечание: *Шамозит – глинистый минерал, относящийся к подклассу листовых.

Note: *Chamosite is a clay mineral in laminal subclass.

По результатам микроскопического (оптического и СЭМ) и рентгенофазового анализа для аргиллитов разведочнической свиты характерно содержание мусковита (50–77 %), кварца (8–28 %), шамозита и монтмориллонита (1–19 %, определялись совместно), плагиоклаза (0–6,4 %). Ориентировка слоистых силикатов (мусковит, шамозит, монтмориллонит) субпараллельная слоистости, благодаря чему аргиллиты обладают пониженной устойчивостью к сдвиговым деформациям вдоль плоскости их ориентировки (рис. 1). С учётом высокого литостатического давления, связанного с глубиной залегания, это может являться одной из причин разрушения ствола скважин. Необходимо отметить, что увеличение количества кварца и полевых шпатов, как и увеличение размеров частиц этих минералов, уменьшает пластичность пород и повышает их устойчивость.

Свойства глинистых пород, представленных смешанно-слоистыми соединениями, обусловлены их структурами. Во всех образцах обнаружена фаза монтмориллонита, которая определяет коллоидно-химическую активность, набухание, способность к повышенной гидратации [13–16]. Способ-

ность к набуханию подтверждено дополнительными рентгеновскими исследованиями на нескольких исследуемых образцах. При пропитке их водой или, наоборот, при нагревании и испарении воды рефлексы фазы монтмориллонита смещаются относительно рефлексов шамозита, указывая на изменение кристаллической решетки и внедрение/выход молекул воды из решетки кристаллов. По результатам рентгенофазового анализа весовая доля монтмориллонита составляет 3–10 %. Р. Грим [17] показал, что примеси монтмориллонита (~5 %) в глинах различного состава обуславливают сильное увеличение верхних пределов пластичности. Беспорядочное чередование этих минералов в глинистой породе чревато осложнениями в скважине.

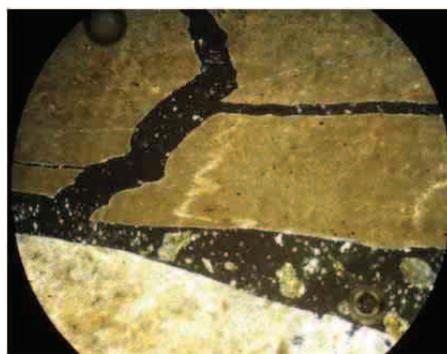


Рис. 1. Прожилки плейчатого облика (светлые извилистые линии), возникшие при неравномерном проскальзывании пакетов аргиллита. Ширина поля зрения 2,2 мм, николи скрещены

Fig. 1. Fibers of puckered habitus (light curved lines) occurred at inhomogeneous sliding of mudstone system. Field width is 2,2 mm, crossed nicols

Для отложений тунгусской серии по результатам микроскопического (оптического и СЭМ) и рентгенофазового анализа характерно преобладание мусковита (38–65 %), кварца (21–43 %), плагиоклаза (2–12 %), шамозита и монтмориллонита (6–15 % по результатам рентгенофазового анализа). Содержание углистого вещества составляет до 25 %. Алевролиты, аргиллиты и песчаники часто обнаруживают тонкое переслаивание с мощностью прослоев от первых мм. Особенности состава и строения изученных горных пород определяют их поведение при бурении. Одним из основных факторов снижения устойчивости пород тунгусской серии является значительное количество углистого вещества. Также устойчивость горных пород, как и в ситуации с отложениями разведочнической свиты, снижается благодаря возрастанию содержания слоистых силикатов (мусковит, шамозит, монтмориллонит). На рис. 2 представлен фрагмент алевролита в углистом аргиллите.

Анализ лабораторных исследований образцов горных пород показал:

1) Образцы представляют собой пористую смесь как кристаллических, так и аморфных минералов.



Рис. 2. Тектонически замятые и окатанные фрагменты алевролита в углистом аргиллите. Ширина поля зрения 2,30 мм, николи не скрещены

Fig. 2. Tectonically contorted and rounded fragments of siltstone in carbonic mudstone. Field width is 2,30 mm, nicols are not crossed

2) В образцах содержатся следующие основные фазы: очень мелкие кристаллы мусковита, крупные кристаллы кварца и шамозит (хлорит).

3) Во всех образцах обнаружена фаза монтмориллонита, которая способна к сильному набуханию в воде. Способность к набуханию подтверждена дополнительными рентгеновскими исследованиями на нескольких исследуемых образцах. При пропитке их водой или, наоборот, при нагревании и испарении воды рефлексы фазы монтмориллонита смещаются относительно рефлексов шамозита, указывая на изменение кристаллической решетки и внедрение/выход молекул воды из решетки кристаллов. По результатам рентгенофазового анализа весовая доля монтмориллонита составляет 1–10 %.

4) Вода присутствует как в свободном, так и в кристаллическом состояниях.

5) По результатам спектроскопического и томографического анализов все образцы были разделены на три группы: А) водоупорные образцы, проникновение воды внутрь образца не обнаруживается на спектрах и на томографических изображениях, вода представлена в свободном (поры) и связанном состояниях (образец № 20/989). Проникновение воды в данный тип образцов не происходит даже при длительном выдерживании (168 ч) в водной среде, эффективная пористость по остаточной воде ($P_{ост}$), находившейся в образце до пропитывания, совпадает с эффективной пористостью (P). Диапазон изменения P для образцов первой группы составляет 1,2–1,6 %. При длительной выдержке в воде P не изменяется в пределах погрешности эксперимента; Б) пропитываемые образцы, проникновение воды внутрь образца обнаруживается на спектрах и на томографических изображениях, вода представлена в свободном (поры) и связанном состояниях (образец № 6/1016). Однако содержание свободной воды в поровом пространстве здесь выше, образцы являются более рыхлыми. Эффективная пористость по остаточной воде лежит в диапазоне от 1,6 %. В отличие от первой группы, данные образ-

цы пропитываются водой. При этом эффективная пористость может достигать значений 2,3–2,7 %; В) разрушаемые образцы, проникновение воды внутрь образца сопровождается набуханием и разрушением его цельности, вода представлена в свободном (поры), связанном и гелевом состояниях (образец № 15/962). Диапазон ($P_{ост}$) составляет 1,4–1,6 %. Однако при пропитывании водой наблюдается интенсивное разрушение образцов в течение первых 30 мин., с расщеплением на тонкие длинные слои (образец № 15/962). Разрушение также происходит и в концентрированных водных растворах солей NaCl, NaF через 4–5 ч. В отличие от образцов первой и второй групп, при пропитывании образцов третьей группы на ЯМР 1H спектрах появляется небольшая по интенсивности третья компонента, которая представляет собой промежуточное состояние воды, характеризующее по ширине линии как гелевое (поверхностно-связанное). Данный тип воды характерен для материалов, в которых происходит включение (связывание) воды в структуру (поверхность) со значительной потерей ее подвижности, однако без образования жестких связей (как в связанном состоянии). Доля такой воды не превышает 4,4 % от общего количества (образец № 15/962). Гидратация образцов 3 группы приводит к появлению третьего состояния, присутствующего в образце воды (помимо свободного и связанного), близкого по свойствам к воде в монтмориллонитовой глине.

Разрушение аргиллитов и хлоритизированных габбро-долеритов при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе связано с их минеральным составом. Вода проникает в микропоры и микротрещины, способствуя раскрытию трещин, гидратации глинистых минералов с образованием площадок скольжения и как следствие приводит к разрушению. Наличие тектонических зон снижает устойчивость пород вне зависимости от их минерального состава.

Напряженное состояние горного массива

В пределах Талнахского рудного узла, на основе натуральных измерений, проведенных рядом исследователей [18, 19], установлен сложный характер полей напряженностей и выявлены закономерности их распределений:

- 1) неоднородность поля естественных напряжений горных массивов связана с морфоструктурами района;
- 2) неоднородность поля естественных напряжений обусловлена наличием крупных тектонических зон, а вне зон их влияния – петрогенетическими особенностями пород геологического разреза;
- 3) при переходе от слаботрещиноватых пород к средне- и сильнотрещиноватым наблюдается снижение ($\approx 20\text{--}30\%$) величин естественных напряжений;
- 4) фоновые значения вертикальных и горизонтальных напряжений для всей структуры Тал-

нахского рудного узла на 13–14 МПа превышают расчетные напряжения, обусловленные весом вышележащих пород. Поэтому можно ожидать увеличения напряжения горного массива и возникновения горных ударов в прочных и крепких породах на глубинах более 700 м, где величины естественных напряжений сопоставимы или превышают прочность горных пород. Преимущественно горные удары проявляются в слаботрещиноватых породах с жесткими кристаллизационными связями, характеризующимися хрупким разрушением, это интрузивные породы – габбро-долериты различного состава. Зоны концентрации напряжения, вызывающие горные удары в любой форме, отмечаются, как правило, на участках слаботрещиноватых пород, в пределах контура рудоносной габбро-долеритовой интрузии, особенно вблизи контактов с вмещающими осадочными породами. Величина напряжения на глубине залегания рудоносной интрузии колеблется от 35 до 69 МПа. Шовные зоны тектонических нарушений характеризуются минимальными значениями напряжений и низкими значениями показателей деформационных свойств слагающих пород. Высокая степень нарушенности этих массивов очень сильно влияет на устойчивость стенок скважин при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе и становится причиной возникновения обрушений и вывалов.

Всё вышеописанное также относится и к сульфатно-карбонатным отложениям силура-девона, тоже залегающим на больших глубинах. Установлено, что ниже 1000 м увеличивается хрупкость горных пород, таких как мергели и доломиты, что приводит к динамическим проявлениям горного давления (горным ударам). Габбро-долериты и метаморфизованные породы (роговики, метаморфизованные доломиты и известняки) изначально относятся к жестким породам и тем более склонны к подобным проявлениям. Ещё одной причиной, делающей неустойчивыми в стенках выработок такие породы, как аргиллиты и в меньшей степени мергели, являются свойственные им максимальные деформации свободной разгрузки, снижающие показатели прочности на 40–45 % и упругие показатели на 30–35 % [18].

Выводы

1. Анализ и исследование геологического материала Талнахского рудного узла показал, что неустойчивость стенок скважин связана с напряженным состоянием горного массива и со специфическим минеральным составом материала, заполняющего трещины рудных зон и слагающего стенки скважин в осадочных толщах.
2. Аналитические исследования показали, что образцы горных пород представляют пористую смесь (0,1–5 мкм) кристаллических и аморфных минералов.

3. Во всех представленных образцах обнаружен монтмориллонит.
4. Рудоносные габбро-долериты мелко- и среднезернистые изменены, перемяты, хлоритизированы.
5. Разрушение аргиллитов и обрушение габбро-долеритов при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе связано с их минеральным составом, в частности, с наличием хлорита и монтмориллонита. Вода проникает в микропоры и микротрещины, способствуя раскрытию трещин, гидратации глинистых минералов с образованием площадок скольжения и, как следствие, приводит к разрушению. Наличие тектонических зон снижает устойчивость пород вне зависимости от их минерального состава.
6. В работе [3] показано влияние гидродинамического давления на устойчивость стенок скважины. Теоретически и практически было доказано, что создаваемый буровым раствором градиент гидродинамического давления может значительно влиять на устойчивость ствола. Объемная скорость и направление течения в порах пласта определяются перепадом давления Δp , или разностью давления, создаваемого столбом бурового раствора p_w , и пластовым давлением, т. е. $\Delta p = p_w - p_f$. В момент вскрытия пласта Δp действует на стенки скважины, но с течением времени градиент давления распространяется и на поровое пространство пласта. По достижении условий равновесия поровое давление p_f на любом радиальном расстоянии от оси скважины определяется с помощью хорошо известного уравнения радиального течения [19]. Стабилизирующее действие положительного перепада давления, развиваемого буровым раствором, намного сильнее, если в стволе скважины находится буровой раствор с регулируемыми фильтрационными свойствами, так как проницаемость глинистой корки примерно в 3 раза меньше проницаемости любой породы (кроме глинистого сланца). В результате почти весь перепад давления Δp приходится на глинистую корку. В этом случае Δp действует как поперечное давление, упрочняющее горную породу. Из сказанного следует, что сжимающие напряжения на стенке скважины могут быть уменьшены, а устойчивость ствола повышена путем увеличения плотности бурового раствора. В связи с этим необходимо заметить, что принципиальным моментом является определение плотности бурового раствора, обеспечивающего необходимое противодавление на критической глубине [20].

Анализ В.С. Новикова показал, что методы определения оптимальной плотности раствора в большинстве случаев не отражают объективных соотношения горного и порового давления в массиве и физико-механических свойств пород на стенке скважины и не позволяют прогнозировать устой-

чивость глинистых пород в процессе бурения. В работе [21] определена предельно допустимая плотность раствора для условий Норильского рудного узла (1,03–1,11 г/см³). Производственные исследования при сооружении глубоких скважин на ТРУ показали, что увеличение плотности до 1,2 г/см³ не позволило обеспечить сохранность ствола скважины при перебурировании габбро-долеритов, трещины которых выполнены хлоритом. Необходимо отметить, что плотность повышали за счет добавления расчетного количества поваренной соли, а условная вязкость (по СПВ-5) составляла 20 сек. Практические исследования, выполненные В.Д. Городновым [22], показали, что влияние гидростатического давления на устойчивость стенок скважины, сложенных на 80–90 % слабоувлажненными аргиллитами, не только не предотвратило осложнений, но, наоборот, интенсифицировало их, что в конечном итоге привело к обвалу пород с потерей циркуляции. С повышением гидростатического давления возрастает перепад давления в системе скважина–пласт и, следовательно, глубина проникновения фильтрата бурового раствора. Проникающий по микротрещинам фильтрат вызывает понижение твердости глинистых пород и, как следствие, обрушение стенок скважины. Визуальные наблюдения при извлечении кернового материала из керноприемной трубы показали, что в габбро-долеритах (рудная зона, рис. 3) преобладают трещины под углом 70–80° к горизонту, выполненные хлоритом. Солевые растворы разрушают структуру связанной воды в хлоритах, понижают ее вязкость в граничном слое, что в конечном итоге приводит к разрушению стенок скважин и делает дальнейшее углубление практически невозможным. Поэтому требования к величине водоотдачи при бурении по глинистым и хлоритизированным породам должно быть значительно выше. Величина водоотдачи и перепада давления играют значительную роль, но не являются определяющими в сохранении устойчивости стенок скважины, сложенных глинистыми и хлоритизированными горными породами.

7. По заданию ООО «Норильскгеология» были проведены лабораторные исследования буровых растворов, содержащих силикат натрия, разработана технология приготовления растворов с добавками крахмала. Добавление жидкого стекла от 40 мл/л раствора благоприятно сказывается на сохранности хлоритовых образцов. На поверхности хлорита появляется нерастворимая силикатная пленка, которая препятствует гидратации образца. Визуальный осмотр показал, что фильтрат не проникает внутрь образца, что свидетельствует о взаимодействии силиката с катионами, в результате наблюдается естественная силикатизация хлоритов и монтмориллонита. Применение модифицированного крахмала позволяет контролировать фильтрационные потери совместно с жидким стеклом. Проявляется синергизм при

содержании жидкого стекла от 80 до 100 мл/л раствора. Силикат натрия, как показали наши исследования, характеризуется отличной коагулирующей способностью, а хлорид натрия работает как ионный насос, засасывая в глинистую породу воду, что впоследствии приводит к повышению подвижности пород и осыпанию стенок скважины. В табл. 2, 3 приведены расчетные значения потерь давления полимерных растворов с добавками жидкого стекла, рассчитанные по методике, изложенной в [23].



Рис. 3. Габбро-долериты, скважина РТ-11. Интервал отбора керна: а) 1547–1552; б) 1552–1557 м

Fig. 3. Gabbro-dolerites, RT-11 well. Core sample interval is: а) 1547–1552; б) 1552–1557 m

Анализ представленных расчетных результатов показывает, что применение полимерных растворов с данными реологическими параметрами возможно при увеличении кольцевого зазора при бурении скважин комплексами КССК. Это можно осуществить за счет увеличения (разбуривания) расчетного участка скважины до диаметра 93 мм или разработкой породоразрушающего инструмента с номинальным диаметром 80–82 мм.

8. При бурении по кровле рудной зоны необходимо заменить полимерсолевой раствор на полимерсиликатный. На первом этапе состав раствора: гаммаксан 0,2–0,3 мас. %, ПАЦ-LV

Таблица 2. Расчетные значения потерь давления полимерных растворов с добавками 50/1000 мл раствора жидкого стекла ($\rho=1,35 \text{ г/см}^3$) при расходе раствора 30 л/мин и частоте вращения бурильной колонны 500 об/мин

Table 2. Calculated values of pressure losses in polymer solutions with 50/1000 ml of liquid glass solution ($\rho=1,35 \text{ g/cm}^3$) at solution rate 30 l/min and rotation rate of drill stem 500 rpm

Химические реагенты, мас. % Chemical agents, wt. %		Реологические параметры степенной модели ($\tau=K\dot{\gamma}^n$) Rheological parameters of a power law model ($\tau=K\dot{\gamma}^n$)		Потери давления, Па/м Pressure losses, Pa/m					
Гаммаксан Gammaksan	ПАЦ-LV PATs-LV	n	K, мПа*с K, mPa*s	Кольцевой зазор, мм Annular space, mm					
				3	4	5	7	9	11,5
0,3	0,5	0,5	0,54	14023	7014	4459	2016	1093	591
0,4	0,5	0,45	0,97	17468	9469	5795	2691	1486	820
0,5	0,5	0,43	1,39	21600	11820	7289	3420	1905	1062
0,2	1,0	0,65	0,26	20036	9858	5623	2354	1208	621

0,2–0,5 мас. %, жидкое стекло 50/1000 л раствора. Далее увеличиваем количество жидкого стекла на 10 л на каждые следующие 1000 л раствора. Максимальное количество жидкого стекла 100/1000 л раствора. Количество гаммаксана, ПАЦ-LV или крахмала необходимо корректировать по вязкости и потерям давления непосредственно на буровом агрегате. Это предварительные рекомендации, которые будут уточняться непосредственно при бурении глубоких скважин по согласованию с технологической службой ООО «Норильскгеология».

9. Параметр СНС раствора контролируется биополимером «ГАММАКСАН», поэтому концентрация должна быть не менее 0,3 мас. %. ПАЦ-LV не влияет на структуру раствора, а увеличивает пластическую вязкость – в этом и проявляется синергетический эффект. Критерием осаждения или нахождения шлама во взвеси может

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых платинометаллических руд / пер. с англ. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. – 438 с.
2. Формы нахождения благородных металлов в рудах комплексных месторождений: методология изучения, количественные характеристики, технологическое значение / Н.С. Бортников, В.В. Дистлер, И.В. Викентьев, Г.Н. Гамянин, А.В. Григорьева, Т.Л. Гроховская, С.Ф. Служеникин, Б.Р. Тагиров // Проблемы минералогии России: сб. научн. тр. – М.: Изд-во ГЦ РАН, 2012. – С. 365–385.
3. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.

Таблица 3. Расчетные значения потерь давления полимерных растворов с добавками 100/1000 мл раствора жидкого стекла ($\rho=1,35 \text{ г/см}^3$) при расходе раствора 30 л/мин и частоте вращения бурильной колонны 500 об/мин

Table 3. Calculated values of pressure losses in polymer solutions with 100/1000 ml of liquid glass solution ($\rho=1,35 \text{ g/cm}^3$) at solution rate 30 l/min and rotation rate of drill stem 500 rpm

Химические реагенты, мас. % Chemical agents, wt. %		Реологические параметры степенной модели ($\tau=K\dot{\gamma}^n$) Rheological parameters of a power law model ($\tau=K\dot{\gamma}^n$)		Потери давления, Па/м Pressure losses, Pa/m					
Гаммаксан Gammaksan	ПАЦ-LV PATs-LV	n	K, мПа*с K, mPa*s	Кольцевой зазор, мм Annular space, mm					
				3	4	5	7	9	11,5
0,2	1,0	0,65	0,25	19265	9479	5403	2264	1161	597
0,3	1,0	0,57	0,50	21609	11049	6479	2825	1490	787
0,4	0,5	0,45	0,83	14946	8097	4957	2301	1269	701
0,5	0,5	0,42	1,42	20505	11271	6977	3291	1839	1027

служить перелив раствора при отрыве инструмента от забоя для извлечения керноприемной трубы или наращивания бурильной штанги. Если наблюдается «перелив», это свидетельствует об осаждении шлама и его накоплении в нижней части скважины. В конечном итоге осаждение шлама может привести к прихвату инструмента, а повышенные давления приводят к нарушению целостности изношенных бурильных труб и как следствие к аварийным ситуациям.

10. Для проведения каротажных работ в открытом стволе необходимо, чтобы ствол скважины был устойчивым. Для решения этой задачи необходимо применение псевдопластичных растворов с реологическими параметрами $n=0,3-0,5$, $K \approx 0,5-0,8 \text{ мПа*с}$, СНС $\approx 1-3 \text{ Па}$, что хорошо согласуется с [24] низкой фильтрацией 4–5 см³ за 30 минут.

4. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений / А.Д. Генкин, В.В. Дистлер, Г.Д. Гладышев, А.А. Филимонова, Т.П. Евстигнеева, В.А. Коваленкер, И.П. Лапутина, А.В. Смирнов, Т.Л. Гроховская. – М.: Наука, 1981. – 234 с.
5. Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М.: Госгеолтехиздат, 1959. – 67 с.
6. Петрология сульфидного магматического рудообразования / В.В. Дистлер, Т.П. Гроховская, Т.Л. Евстигнеева, С.Ф. Служеникин, А.А. Филимонова, О.А. Дюжиков, И.П. Лапутина. – М.: Наука, 1988. – 231 с.
7. Додин Д.А., Батуев Б.Н. Геология и петрология талнахских дифференцированных интрузий и их метаморфического ореола // Петрология и рудоносность талнахских и норильских дифференцированных интрузий. – Л.: Недра, 1971. – С. 31–101.

8. Геология и рудоносность Норильского района / О.А. Дюжиков, В.В. Дистлер, Б.М. Струнин, А.К. Мкртычян, М.Л. Шерман, С.Ф. Служеникин, А.М. Лурье. – М.: Наука, 1988. – 279 с.
9. Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии / В.В. Золотухин, В.В. Рябов, Ю.Р. Васильев, Ю.А. Шаткое. – Новосибирск: Наука, 1975. – 434 с.
10. Зотов И.А. Генезис трапповых интрузивов и метаморфических образований Талнаха. – М.: Недра, 1979. – 155 с.
11. Кравцов В.Ф., Седых Ю.Н., Гор Ю.Г. Геолого-структурные особенности Талнахского рудного поля // Петрология и рудоносность талнахских и норильских дифференцированных интрузий. – Л.: Недра, 1971. – С. 8–31.
12. Опарин В.Н. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 278 с.
13. Кульчицкий Л.И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1975. – 212 с.
14. Осипов В.И. Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 4. – С. 291–305.
15. Осипов В.И. Внутрикристаллическое разбухание глинистых минералов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 5. – С. 387–398.
16. Гизатуллин Б.И., Архипов Р.В., Сулейманова Е.А. Исследование гидратации бентонитовых глин методом ядерного магнитного резонанса // Георесурсы. – 2011. – № 6 (42). – С. 35–39.
17. Грим Р.Е. Минералогия и практическое использование глин. – М.: Мир, 1967. – 512 с.
18. Инженерно-геологические условия месторождений сульфидных медно-никелевых руд Талнахского рудного узла в полях рудников «Скалистый» и «Глубокий» / Г.А. Голодковская, Л.В. Шаумян, Э.С. Балашайтис, М.Б. Куринов, В.В. Ковалко, Н.А. Румянцева, И.А. Уткина, В.Н. Широков – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 561 с.
19. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 628 с.
20. Новиков В.С. Устойчивость глинистых пород при бурении скважин. – М.: Недра, 2000. – 270 с.
21. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в осложненных условиях. – М.: Недра, 1987. – 269 с.
22. Городнов В.Д. Физико-химические методы предупреждения осложнений в бурении. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 229 с.
23. Борисов Ф.И., Неверов А.Л., Рожков В.П. Расчет потерь давления при бурении с ССК с полимерной промывочной жидкостью // Известия вузов. Геология и разведка. – 1990. – № 7. – С. 125–130.
24. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Изд-во «Летопись», 2005. – 664 с.

Поступила 17.03.2014 г.

UDC 622.243

ANALYSIS OF MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF A LONG BOREHOLE DRILLING ON TALNAKH ORE CLUSTER

Vyacheslav V. Neskromnykh,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue,
Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sovair@bk.ru

Aleksandr L. Neverov,

Cand. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue,
Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Vladimir P. Rozhkov,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue,
Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Dmitri D. Karataev,

Norilskgeologiya, post office box 889, Norilsk, 663330,
Russia. E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Aleksandr A. Neverov,

M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, 31, Gazeta Kranoyarsky
Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: aaneverov@gmail.com

Relevance of the work is caused by the necessity to drill the exploratory wells for searching rich copper-nickel ores at deep levels and flanks of Talnakh ore cluster.

The main aim of the study is to analyze geological and technical conditions of drilling deep wells on Talnakh ore cluster; to study rock samples for further development of well construction technology using the complexes with removable core tubes.

The methods used in the study: visual core description, analytical researches using the methods of X-ray fluorescence spectrometry, electron microscopy, X-ray, spectroscopic and tomographic analysis to determine the mineral composition of argillaceous rocks; labora-

tory testing of samples of chloritized rocks; calculations of pressure loss while drilling using complexes with removable core tube with polymer solution.

The results. Analysis and research of geological material of Talnakh ore cluster showed that the instability of the walls of wells occurs due to stress state of rock mass and a specific mineral composition of the material filling the cracks of ore zones and composing the walls of wells in sedimentary sequences. The analytical researches revealed that the samples are porous rocks mixture (0,1–5 microns) of crystalline and amorphous minerals. Destruction of mudstone and gabbro-dolerite collapse when interacting with water-based drilling fluids occur due to their mineral composition, in particular with the presence of chlorite and montmorillonite. Water penetrates into micropores and microcracks which promotes disclosure cracks, hydration of clay minerals with sliding pads formation and as a consequence, leads to destruction. Calculation of the pressure loss showed the need to develop diamond crowns with an outer diameter of 80–82 mm for drilling with the complex with a wireline in difficult geological conditions of Talnakh ore cluster.

Key words:

Geological material, clay mineral, chlorite, gabbro-dolerite, borehole walls stability, stress state of rock mass, pressure loss.

REFERENCES

1. Naldrett A.Dzh. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh platinometalnykh rud* [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel platinum metal ores]. St-Petersburg, SPbGU Press, 2003. 438 p.
2. Bortnikov N.S., Distler V.V., Vikentev I.V., Gamyaniy G.N., Grigoreva A.V., Grokhovskaya T.L., Sluzhenikin S.F., Tagirov B.R. *Formy nakhozheniya blagorodnykh metallov v rudakh kompleksnykh mestorozhdeniy: metodologiya izucheniya, kolichestvennyye kharakteristiki, tekhnologicheskoe znachenie* [Problems of mining of Russia]. Moscow, GC RAN Publ., 2012. pp. 365–385.
3. Grey J.R., Darli G.S.G. *Sostav i svoystva burovnykh agentov (promyvochnykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling agents (drilling fluids)]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
4. Genkin A.D., Distler V.V., Gladyshev G.D., Filimonova A.A., Evstigneeva T.P., Kovalenker V.A., Laputina I.P., Smirnov A.V., Grokhovskaya T.L. *Sulfidnye medno-nikelevye rudy norilskikh mestorozhdeniy* [Copper-nickel sulfide ore deposits of Norilsk]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 234 p.
5. Godlevsky M.N. *Trappyy i rudonosnye intruzii Noril'skogo rayona* [Trapps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1959. 67 p.
6. Distler V.V., Grokhovskaya T.P., Evstigneeva T.L., Sluzhenikin S.F., Filimonova A.A., Dyuzhikov O.A., Laputina I.P. *Petrologiya sulfidnogo magmaticheskogo rudoobrazovaniya* [Petrology of magmatic sulfide ore formation]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 231 p.
7. Dodin D.A., Batuev B.N. *Geologiya i petrologiya talnakhskikh differentsirovannykh intruziy i ikh metamorficheskogo oreola* [Petrology and ore-bearing of Talnakh and Norilsk differentiated intrusions]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. pp. 31–101.
8. Dyuzhikov O.A., Distler V.V., Strunin B.M., Mkrtnyan A.K., Sherman M.L., Sluzhenikin S.F., Lure A.M. *Geologiya i rudonost Noril'skogo rayona* [Geology and ore-bearing of Norilsk region]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 279 p.
9. Zolotukhin V.V., Ryabov V.V., Vasilev Yu.R., Shatkoe Yu.A. *Petrologiya Talnakhskoy rudonosnoy differentsirovannoy trappovoy intruzii* [Petrology of Talnakh ore-bearing differentiated trappean intrusion]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 434 p.
10. Zotov I.A. *Genesis trappovykh intruzivov i metamorficheskikh obrazovaniy Talnakha* [Genesis of trappean intrusives and metamorphic formations of Talnakh]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 155 p.
11. Kravtsov V.F., Sedykh Yu.N., Gor Yu.G. *Geologo-strukturnyye osobennosti Talnakhskogo rudnogo polya* [Petrology and ore-bearing of Talnakh and Norilsk differentiated intrusions]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. pp. 8–31.
12. Oparin V.N. *Zonalnaya dezintegratsiya gornyykh porod i ustoychivost podzemnykh vyrabotok* [Zonal disintegration of rocks and stability of underground workings]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publishing House, 2008. 278 p.
13. Kulchitskiy L.I. *Rol vody v formirovaniy svoystva glinistykh porod* [The role of water in formation of properties of argillaceous rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 212 p.
14. Osipov V.I. *Nanoplenki adsorbirovannoy vody v glinakh, mekhanizm ikh obrazovaniya i svoystva* [Nanofilms of adsorbed water in clays, the mechanism of their formation and properties]. *Environmental Geoscience*, 2011, no. 4, pp. 291–305.
15. Osipov V.I. *Vnutrikristallicheskie razbukkhanie glinistykh mineralov* [Intracrystalline swelling of clay minerals]. *Environmental Geoscience*, 2011, no. 5, pp. 387–398.
16. Gizatullin B.I., Arkhipov R.V., Suleymanova E.A. *Issledovanie gidratatsii bentonitovykh glin metodom yadernogo magnitnogo rezonansa* [Study of hydration of bentonite clays by NMR method]. *Georesources*, 2011, no. 6 (42), pp. 35–39.
17. Grim R.E. *Mineralogiya i prakticheskoe ispolzovanie glin* [Mineralogy and practical use of clay]. Moscow, Mir Publ., 1967. 512 p.
18. Golodkovskaya G.A., Shaumyan L.V., Balashaytis E.S., Kurinov M.B., Kovalko V.V., Rummyantseva N.A., Utkina I.A., Shirokov V.N. *Inzhenerno-geologicheskyye usloviya mestorozhdeniy sulfidnykh medno-nikelevykh rud Talnakhskogo rudnogo uzla v polyakh rudnikov Skalisty i Glubokiy* [Engineering and geological conditions of sulfide copper and nickel ores of Talnakhskoe deposits in Skalisty and Glubokiy ore mine fields]. Moscow, MGU Publ., 1967. 561 p.
19. Masket M. *Techenie odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede* [Flow of homogeneous fluids in porous media]. Izhevsk, Institute of Computer Sciences Publ., 2004. 628 p.
20. Novikov V.S. *Ustoychivost glinistykh porod pri burenii skvazhin* [Stability of argillaceous rocks when drilling wells]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 270 p.
21. Kudryashov B.B., Yakovlev A.M. *Burennyye skvazhiny v oslozhnennykh usloviyakh* [Well drilling under complicated conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 269 p.
22. Gorodnov V.D. *Fiziko-khimicheskiye metody preduprezhdeniya oslozhneniy v burenii* [Physicochemical methods of preventing complications in drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 229 p.
23. Borisov F.I., Neverov A.L., Rozhkov V.P. *Raschet poter davleniya pri burenii s SSK s polimernoy promyvochnoy zhidkostyu* [Calculation of pressure loss while drilling with core barrel with inner tube with the polymer washing liquid]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1990, no. 7, pp. 125–130.
24. Ryazanov Ya.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg, Letopis Publ., 2005. 664 p.

Received: 17 March 2014.