

УДК 553.493.67: 553.81(571.56)

Особенности карстово-солифлюкционного процесса в породах, слагающих Сохсохоский грабенообразный прогиб

П.В. Некрасов

Вилуйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО)

678190, п. Айхал, шоссе Алмазодобытчиков, д. 3. E-mail: pavel.nekrasoff2018@yandex.ru

(Статья поступила в редакцию 13 декабря 2023 г.)

Рассмотрены особенности формирования карстово-солифлюкционных коллекторов в восточной части Сохсохоского прогиба, прослежены этапы их развития. Установлены пространственная и генетическая связи микрокомпонентов, элементов «ловушек» синформенных структур, депрессий с проявлениями гидрофактора и особенностями геодинамического развития платформы в девono-триасовой эпохе. Выявлены основные закономерности пространственного размещения карстовых коллекторов с прогибами и депрессиями, а также их связь с гидротермальной рудоносностью.

Ключевые слова: *динамическая зона пласта, карстово-солифлюкционный процесс, подинтрузивные карстовые отложения, жила «Каротажная», ореолы рассеянной минерализации, Сохсохоский грабенообразный прогиб (СГП).*

DOI: 10.17072/psu.geol.23.1.10

Введение

Девонский период, длившийся 58 млн лет, характеризовался активной генерацией различных видов полезных ископаемых – от углеводородов до руд и эвапоритов. В земной коре в это время происходили колоссальные эндогенные процессы по движению континентов и образованию новых, благоприятствовавшие образованию и переносу к верхним слоям земли множества ценных компонентов. Однако под влиянием экзогенных и иных факторов они подвергались значительным трансформациям, в частности процессу переотложения.

Среди основных факторов, которые повлияли на это, можно выделить следующие: усиление тектоники, интенсивное осадконакопление, гидрогеологические условия, климатическую обстановку.

Цель данной работы – установить основные закономерности строения и формирования карстово-солифлюкционных коллекторов рассеянных элементов в восточной части Сохсохоского грабенообразного прогиба (СГП), уточнить детали в модели геодинамического развития востока СГП, а также осуществить анализ его гидротермальных рудных проявлений.

Задачи исследования:

- изучение процессов замещающего карстообразования, их влияния на формирование коллекторов рассеянных элементов и проблемы, связанные с их активностью;
- исследование взаимодействия замещающего карстообразования с другими геологическими процессами, такими как тектоника и выветривание, для более глубокого понимания их совместного влияния на геологию перекрытых территорий.

Актуальность работы

Изучение особенностей карстового процесса в породах, слагающих СГП, представляет большой интерес для геологов, геоморфологов и других специалистов. Карстово-солифлюкционные процессы (КСП) играют важную роль в формировании рельефа, гидрологической сети и миграции химических элементов, поэтому их изучение помогает лучше понять геологические процессы и историю развития региона. Кроме того, знание особенностей КСП в данной области необходимо для оценки их воздействия на инфраструктуру и экономику, а также для предотвращения негативных последствий карстообразования для горных выработок.

Карстово-солифлюкционный комплексный геодинамический процесс, состоит из взаимодействий проницаемости карстующихся пород, времени проявления экзогенных и эндогенных факторов. В результате происходит растворение горных пород с образованием характерных карстовых форм и перемещение дисперсно-коллоидных образований к барьерной зоне. Изучение данного процесса и его особенностей позволяет лучше понять геологию перекрытых территорий и определить потенциальные области для проведения геохимических методов поисков полезных ископаемых.

Под геодинамическим понимается процесс, который приводит к трансформациям в земной коре и мантии, включая движение, деформацию и изменение формы в геологическом времени количественного и качественного характера. Эти процессы могут быть вызваны различными факторами, такими как тектоника плит, вулканизм, землетрясение и другие.

Геолого-структурная обстановка

В юго-западном крае Анабарского мегаблока в пределах Далдыно-Маганского блока ранее были выделены палеозойские структуры – Сохсолохский грабенообразный прогиб (СГП) и Нижне-Томбинская рифтоподобная структура (НТРС).

Сохсолохский грабенообразный прогиб фиксируется в зоне сочленения Анабарской антеклизы с Тунгусской синеклизой. Прогиб ограничен разломами широтного и северо-восточного простирания. Он был выделен в 2008 г. по результатам проводившейся региональной аэромагниторазведки. Предполагается, что его формирование началось с раскрытия в рифее или среднем палеозое Катанго-Котуйского авлакогена (Западно-Анабарской рифтовой системы по Б.Р. Шпунту, 1982). Прогиб представляет собой тектоническую зону, ответвляющуюся от Котуйканской рифтогенной структуры. По мнению некоторых исследователей (Горев, 2009), подобные структуры, получившие название глубинных зон разломов II порядка, контролируют кимберлитовые поля и могут рассматриваться в качестве структурно-тектонического критерия, благоприятного

для локализации кимберлитов. По динамике развития складчатые разломы являются сбросами, взбросами и надвигами с падением плоскостей сместителя к востоку – северо-востоку. Нарушения имеют сбросовый и сбросо-сдвиговый характер, отличаются малыми амплитудами (Гапотченко, Морозова, 2017; Салихов и др., 2020).

Внутреннее строение Сохсолохского прогиба отличается от строения прилегающих структурных блоков преимущественным развитием пликативных и дизъюнктивных формаций северо-восточного простирания, в частности сложнопостроенных локальных депрессий – Айхальской, Байтахской, Центральной и Алакитской.

Формирование данных дизъюнктивов связывается с системами глубинных разломов северо-восточного простирания, в частности с Безымянным и Мерчимденским разломами (имеющими северо-восточные вектора схождения), ограничивающими СГП с севера и юга. Помимо основных тектонических нарушений северо-восточного и северо-западного простирания выделяются также субширотные и субмеридиональные разломы, образующие обширную веерообразную сеть трещин в разрезе с позже оформившимися синформенными и анформенными локальными структурами, амплитуда которых достигает 250 м. Ось грабена ориентирована ортогонально простиранию региональных структур фундамента (Иванов и др., 2021; Салихов и др., 2020).

Все вышерассмотренные данные применимы для хорошо изученной восточной части СГП до р. Моркоки, за ней на запад – слабоизученные территории. Предполагается, что СГП простирается на сотни км.

Специфика территории района в том, что она расположена в зоне сочленения северо-восточного борта Тунгусской синеклизы с юго-западным склоном Анабарской антиклизы. В его строении выделяют два структурных этажа: кристаллический фундамент и перекрывающий его платформенный чехол, резко различных по своему строению и времени формирования.

По данным региональных геофизических исследований и буровых работ, глубина залегания кристаллического фундамента составляет 2,0–3,6 км.

Для фундамента района характерно блоковое строение, обусловленное зонами глубинных разломов субмеридионального и субширотного направлений, заложенных в позднеархейское – раннепротерозойское время. Эти разломы, по-видимому, активизировались в платформенный период развития и благоприятствовали проявлению кимберлитового магматизма. Субмеридиональные разломы расположены в осевых частях антиклинорий и относятся к долгоживущим структурам.

В платформенном чехле района выделяются два структурных яруса: архей-нижнепалеозойский и верхнепалеозойский-нижнемезозойский, разделенные длительным перерывом в осадконакоплении. В конце девона в Далдыно-Алакитском районе активизировались магматическо-тектонические процессы с образованием обширных эффузивных и интрузивных отложений, которые были особенно сильными в конце раннего триаса. Но к пермскому времени продолжительная стадия сглаживания рельефа подошла к концу (Зинчук, 2023). Верхнепалеозойско-нижнемезозойский ярус представлен карбонатно-терригенными осадочными породами С – Р возраста и субвулканическим породами комплекса Р₂–Т. Породы яруса несообразно закрывают денудированную поверхность ордовикско-силурийского карбонатного цоколя.

Большинство исследователей считают, что рудоконтролирующие нарушения являются отражением на земной поверхности глубинных разломов первого порядка, которые в осадочном чехле разветвляются в разрывные нарушения второго-третьего порядка, постепенно переходя в зоны повышенной трещиноватости и дробления. С тектономагматическими активизациями напрямую соотносится интенсивное развитие дислокаций (разрывных и пликативных) в пределах грабена (Иванов и др., 2021).

Главной особенностью района исследования является его принадлежность к III-V геотипам, ввиду того что породы трапповой формации занимают более 50 % площади района. Данные исследователей последних лет позволяют рассматривать траппы Далдыно-Алакитского района как разновозрастные и разнофациальные образования, пред-

ставленные жерловой, интрузивной, эффузивной и субвулканическими фациями. Основная масса траппов Далдыно-Алакитского района образует весьма сложное покровно-интрузивное геологическое тело в верхней части разреза платформенного чехла. Типично интрузивная фация траппов в районе представлена долеритами нормального ряда, слагающими линейные и кольцевые дайки, а также сопутствующие им мелкие штокообразные интрузии (Коробков и др., 2017).

Осадочный чехол рассматриваемой локации литологически представлен: карбонатными породами верхнего кембрия, нижнего, среднего ордовика, нижнего силура, корами выветривания на карбонатных породах, терригенные породы среднего – верхнего карбона, нижней и верхней перми, вулканогенными образованиями нижнего триаса и четвертичных отложений.

По геоморфологической характеристике район работ является частью крупной структуры Средне-Сибирского плоскогорья и представляет структурно-денудационное плато, расчленённое глубокими речными долинами. Рельеф сформирован на горизонтально залегающих карбонатных породах ордовика и силура, перекрытых терригенными отложениями пермо-карбона и траппами.

Для поверхности траппового плато характерен структурно-денудационный пологохолмистый рельеф с отдельными останцами возвышенностей, структурными ступенями и развалами крупных глыб. Абсолютные отметки поверхности траппового плато составляют 400–670 м, относительные превышения достигают 150–200 м.

Трапповое плато обрамляется крупными, часто обрывистыми, уступами. Высота их достигает 30–40 м. Ниже уступов наблюдаются обширные нагромождения крупных глыб траппов.

Склоны речных долин характеризуются развитием эрозионно-денудационных процессов. Они сформированы на плотных карбонатных породах силурийского и ордовикского возраста. Форма склона выпукло-вогнутая. Как правило, они осложнены структурно-денудационными уступами и расчленены неглубокими ложбинами стока. Крутизна склонов обычно не превышает 3–5°. Крупной ре-

кой района является р. Сохсолох. Долина её полностью расположена в пределах территории исследований. Она ориентирована в субмеридиональном направлении. В долине реки повсеместно развита высокая пойма. Ширина её колеблется от 100 до 300 м. На отдельных участках долины установлены 2 и 1 надпойменные террасы высотой соответственно 9–20 и 5–9 м. Формирование рельефа описываемой территории происходило в течение длительного периода, начиная с мезозоя. Заложение речных долин началось, по-видимому, в неогене в связи с оживлением эпейрогенических движений. Слабая террасовидность склонов речных долин и большая глубина вреза свидетельствуют, очевидно, о непрерывном поднятии территории в течение всего четвертичного периода. В верхнечетвертичное и современное время поднятие, по-видимому, резко замедлилось, что отразилось в образовании довольно широких полей высокой поймы в долинах всех водотоков района (Салихов и др., 2020).

Данные и инструментарий

Для достижения установленных целей: обеспечения качественной оценки формирований, исследуемых посредством бурения скважин, и сбора геологической первичной информации, направленной на определение рудопроявлений, планировалось проведение детального анализа керна из всех пробуренных скважин.

Основными методами отбора проб при выполнении буровых работ были передокументация и фиксация керновых материалов; минералого-шлиховое (шламное и шлиховое) и литохимические исследования образцов из всех скважин участков исследования.

В частности, литохимическое опробование керна скважин предусматривалось для выявления аномальных концентраций химических элементов во вторичных (терригенно-карбонатные породы) и в третичных ореолах рассеяния (терригенные образования каменноугольного возраста) для выявления и оконтуривания аномальных зон, которые могут быть перспективными на обнаружение рудопроявления.

Элементный анализ литохимических проб методом АЭС-ИСП (атомно-эмиссионная

спектрометрия с индуктивно связанной плазмой) проводился на спектрометре iCAP 6300 Duo по аттестованным методикам. Предварительно литохимические пробы были продроблены, истерты и подвергнуты кислотному разложению с использованием микроволновых систем (Иванов, 2016).

Предыдущий опыт работ по объектам Алакит-Моркокинский (Иванов, 2005), Алакит-Сохсолохский (Поляничко, 2006), Верхне-Чукукский (Иванов, 2010), Подтрапповый-2 (Цыбульская, 2012), Верхне-Чукукский-2 (Иванов, 2016) показывает, что коры выветривания фиксируются в 5 % пробуренных скважин, а силлы долеритов, располагающиеся внутри пород карбонатного цоколя, в 25 % скважин.

На территории исследования по всем 3-м участкам (Н1; Н2; Н3) был передокументирован керновый материал в сухое летнее время поисковых, заверочных и оценочных скважин, бурившихся по сети 250×250 и 125×250 м.

В каждой скважине в керновых материалах присутствовали: проявления вторичной минерализации (в объёмах, доступных для не вооружённого глаза); системы каверн и пустот; зон трещиноватости, зеркал скольжений, элементов флексур; кор выветривания и карстовых отложений. Относительно гидротермальной рудоносности исторически принято, что локация несостоятельна.

Однако рассмотрим фактический материал по нескольким объектам АМКП, подтверждающий вышеописанное. Объекты приурочены к крайней северо-восточной части СГП и в особенности расположены в непосредственной близости от склонов р. Сохсолох.

Участок Н1

Участок Н1 расположен в 4,0 км на север от базы и имеет размер в 9 км². Протягивается от долины р. Сохсолох-Мархинский в северо-восточном направлении. Расположение участка относится к зоне динамического влияния прогнозируемого юго-западного фланга рудовмещающего разлома, в пределах которого к северо-востоку от участка выявлены диатермы. Наличие рудовмещающей структуры к юго-западу участка косвен-

но подтверждается зонами дробления карбонатных пород, зеркалами скольжения, глинками трения, сульфидно-кальцитовой минерализацией по трещинам (скв.: Н1-201; Н1-202; Н1-203; Н1-204; Н1-205; Н1-206; Н1-207).

В современном эрозионном срезе на большей части территории участка обнажаются магматические породы и вулканогенные образования трапповой формации пермо-триасового возраста. В меньшей степени отдельными фрагментами картируются терригенные отложения айхальской свиты. Предполагается, что современный рельеф поверхности карбонатного цоколя в пределах участка унаследовал основные черты рельефа айхальского времени. Это подтверждается наличием в понижениях рельефа конгломератов каменноугольного возраста, а также повышенным содержанием в шлихах из базальных горизонтов минералов тяжёлой фракции (МТФ).

По данным имеющегося фактического материала предполагается, что в пределах участка во время накопления подошвенных отложений каменноугольного возраста существовала палеовозвышенность и палеодолина с пологими склонами и относительным

превышением между максимальными и минимальными отметками поверхности палеорельефа карбонатного цоколя около 30–35 м. Палеодолина являлась участком аккумуляции терригенных осадков, в том числе и продуктивных отложений, а палеовозвышенность – участком денудации карбонатных пород. Следует отметить, что современный рельеф погребенной поверхности карбонатного цоколя унаследовал основные черты палеорельефа раннеайхальского времени.

В результате на участке был выявлен обширный ореол МТФ хорошей сохранности, выходящий за пределы участка как в северо-восточном, так и в юго-западном направлении. Ореол МТФ связан с базальным горизонтом терригенных отложений нижней айхальской подсвиты, что, вероятно, обусловлено размывом древнего промежуточного коллектора прибрежно-морского генезиса, имевшего ранее широкое развитие в пределах площади Алакит-Мархинского поля.

В табл. 1 содержания SiO₂ (%), CaO (%), Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Zr, Ba, Pb и Li мкг выделены пиковые значения по элементам конглобритий, в основном подстилающих свиты ордовика.

Таблица 1. Результаты литогеохимического анализа по выборке скважин на исследуемой территории (Н1) (анализ выполнен в ЦАЛ)

ТН	Интервал пробы		Стратиграфия	Литология	SiO ₂ %	CaO%	Vмк/г	Crмк/г	Coмк/г	Niмк/г	Cu мк/г	Znмк/г	Srмк/г	Zrмк/г	Baмк/г	Pbмк/г	Liмк/г
	От	До															
Н1-33	39.3		С2-3аh	Конгломерат	83,6	0,45	35,4	142,66	11,34	76,16	215,8	42,48	75,251	162,8	487,19	21,47	9,428
Н1-34	47.3	48.6	О2-3к1	Брекчия карбонатная	26,9	36,5	55,65	41,431	5,841	16,329	18,39	41,57	123,86	68,92	159,47	10,78	26,13
Н1-35	48.9	49.3	О2-3к1	Брекчия карбонатная	70,8	10,6	11,39	146,55	0,404	11,899	13,04	8,348	55,04	75,15	124,92	9,873	8,754
Н1-36	36		С2-3аh1	Конгломерат	38,0	22,6	33,47	33,611	4,618	14,707	9,195	26,72	68,56	62,16	48,402	9,447	104,1
Н1-37	38.5	43.5	О2-3к1	Брекчия карбонатная	42,6	14,6	63,19	101,01	9,133	29,275	17,15	38,43	73,996	173,6	189,47	11,11	51,69
Н1-38	43.5	47.4	О2-3к1	Брекчия карбонатная	45,4	10,8	306,9	204,53	57,57	162,36	193,5	126,8	184,46	153,7	402,99	6,143	9,539

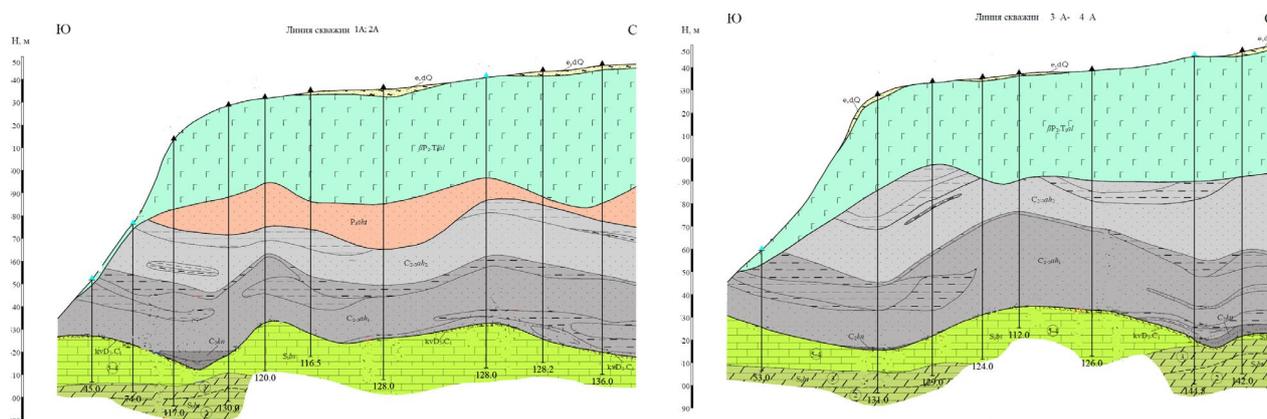


Рис. 1. Выборочные разрезы по скважинам участка Н1 (по Хабибрахмановой А.Р.)

Участок характеризуется неглубоко залегающими грубообломочными коллекторами и превышениями абсолютных отметок $\sim +100$ м относительно других участков. Участок расположен в самой северо-восточной части СГП. Небольшие значения оксидов характеризуют пробы как слабо экзогенные (размыв цемента), а широкие значения Ва и металлов – их выпадение из вмещающих пород.

Участок Н2

Участок расположен в 6 км к северо-западу от базы. Его площадь составляет 50 км^2 . Он ранее был опоискован сетью скважин 250×250 м, местами – 125×125 м, юго-восточная периферия вблизи открытого карбонатного поля вдоль правого борта долины р. Сохсолох изучена шурфами.

Н2 расположен также в зоне рудовмещающего разлома. По комплексу геолого-геофизических данных закартированы разломы северо-восточной, восток-северо-восточной и северо-западной ориентировок. На его площади ранее локализованы контрастные шлиховые ореолы МТФ низкой степени механического износа. В некоторых скважинах в верхней части разреза отложений карбонатного цоколя отмечаются коры выветривания (kvD3-C1), представленные глинисто-железистым материалом бурого цвета, карбонатными породами, интенсивно пропитанными гидроокислами железа, с реликтами первичных структурно-текстурных особенностей. Породы нижнего палеозоя в различной степени трещиноваты, трещины заполнены льдом, прожилками кальцита, ме-

стами отмечается вторичная минерализация в виде различных минеральных выделений гидроокислов железа. В отдельных скважинах трещины выполнены карбонатно-глинистым материалом (скв.: Н2-311; Н2-312; Н2-313; Н2-314; Н2-315; Н2-316; Н2-317; Н2-318; Н2-319; Н2-320; Н2-321), в котором, по данным шлихоминералогического опробования, установлены МТФ без признаков механического износа.

По результатам геохимических исследований участка Н2 выделены 4 аномалии полиметаллической и сидерофильной групп.

Ниже рассматриваются результаты геохимических исследований площади.

1. Аномалии полиметаллического формационного типа. Выделена 1 точечная аномалия – ГХА-1/21, расположенная в верхней части терригенно-карбонатного цоколя. Ведущие элементы представлены As(3,92), Nd(3,24), Pb(3,11). Аномалия низкоконтрастная. Максимальные абсолютные содержания ведущих элементов составляют: As – 0,01 %, Nd – 0,002 %, Pb – 0,002 % (кора выветривания по карбонатным породам, скв. Н2-322, пр. 6, глубина 100,3 м). Поискового интереса выделенная аномалия не представляет и классифицируется как зона рассеянной минерализации.

2. Аномалии группы сидерофильных элементов. Зафиксировано 2 точечные аномалии (ГХА-2/21, ГХА-3/21) в верхней части терригенно-карбонатного цоколя. Ведущие элементы представлены $\text{P}_2\text{O}_5(20,23)$, Y(11,27), Zn(10,33), Co(8,76), $\text{Fe}_2\text{O}_3(6,59)$, MnO(6,32) при участии Nd, Yb, Ce. Аномалии низко-, средне- и высококонтрастные. Максимальные абсолютные содержания ведущих эле-

ментов составляют: P_2O_5 – 0,96 %, Y – 0,004 % (кора выветривания по карбонатным породам, скв. Н2-323, пр. 6, глубина 102,1 м), Zn – 0,03 %, Co – 0,003 %, Fe_2O_3 – 6,62 %, MnO – 0,2 % (кора выветривания по карбонатным породам, скв. Н2-324, пр. 6,

глубина 55,3 м). В поисковом отношении выделенные аномалии интереса не представляют, так как являются типичными породными аномалиями, которые связаны с внедрением интрузий позднепалеозойско-раннемезозойской трапповой формации.

Таблица 2. Результаты литогеохимического анализа из выборки скважин на исследуемой территории Н2 (анализ выполнен в ЦАЛ)

Скв.№	Интервал пробы		Стратиграфия	Литолия	SiO ₂ %	CaO %	V мк/г	Cr мк/г	Ni мк/г	Zn мк/г	Sr мк/г	Zr мк/г	Ba мк/г	Pb мк/г	Li мк/г
H2-15	132,7	135,9	spQIII-hb	Карстовые образования в известняках	30,35	28,23	47,23	46,168	30,303	31,541	231,86	55,048	183,64	18,249	32,226
H2-16	152,6	153,3	C2-3ah1	Карстовые образования в известняках	12,09	39,2	26,532	24,836	19,643	19,768	292,96	35,062	101,71	4,462	17,995
H2-17	128,8	132,6	spQIII-hb	Карстовые образования в известняках	16,95	40,61	27,524	29,134	27,705	57,61	355,5	29,656	111,75	12,942	18,368
H2-18	132		kvD3-C1	Карстовые образования в известняках	55,4	1,552	141,67	149,17	85,979	64,496	123,34	149,73	561,69	21,203	49,118
H2-19	139		kvD3-C1	Конгломерат	57,18	1,265	155,6	66,122	70,772	97,739	42,473	99,744	163,96	39,828	27,727
H2-20	112,8		C2-3ah1	Конгломерат	80,39	0,5228	109,24	340,18	28,561	48,383	68,843	159,59	284,61	18,478	27,453
H2-21	113		kvD3-C1	Конгломерат	50,41	7,975	126,35	60,678	133,07	1502,9	111,61	108,17	155,24	41,486	24,101
H2-22	120,8		kvD3-C1	Кора выветривания по карбонатным породам	20,45	30,43	45,598	49,239	28,936	27,882	310,37	51,257	115,38	6,345	25,78
H2-23	114,95		C2-3ah1	Кора выветривания по карбонатным породам	82,54	2,361	52,253	252,68	33,942	31,234	51,516	97,085	279,52	17,199	18,512
H2-24	115,7		C2-3ah1	Кора выветривания по карбонатным породам	85,64	4,13	43,443	211,59	30,083	74,174	70,446	77,524	251,87	45,082	21,377

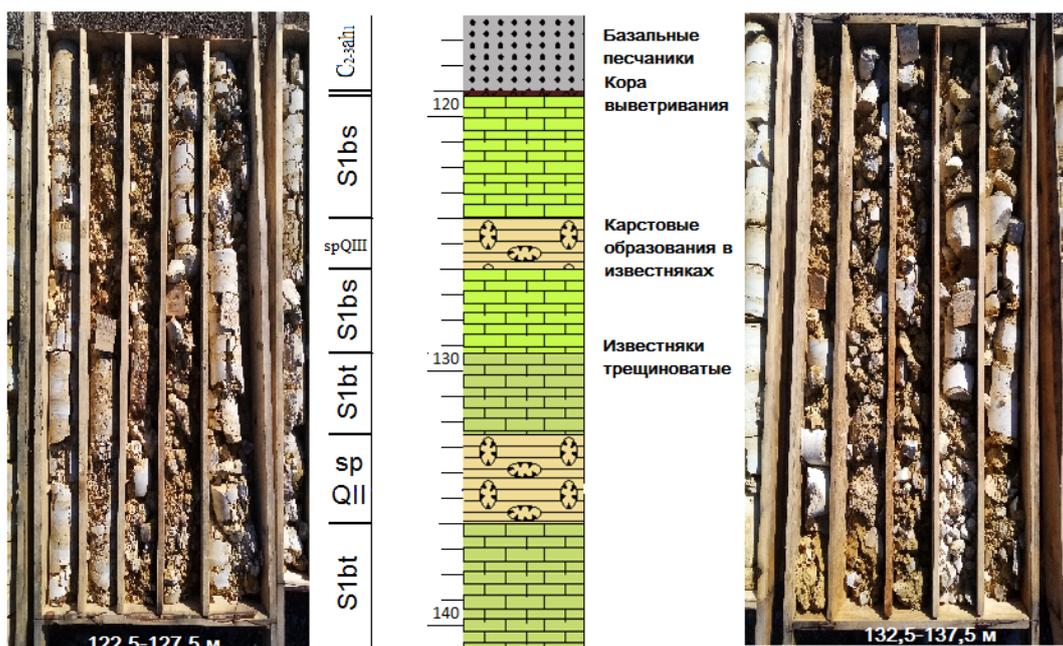


Рис. 2. Литологическая колонка по скв. Н2-1, уч Н2 с фотоматериалом (авторское)

3. Аномалии предположительно полиметаллического генезиса. Выделена 1 точечная аномалия (ГХА-4/21) в верхней части терригенно-карбонатного цоколя. Элементы-индикаторы представлены Rb(7,02), Ba(3,70), MnO(3,67), Zr(3,18) при участии K₂O, Al₂O₃, Sc, TiO₂, Cu, Nb. Величина коэффициента контрастности Nb – 1,47 единицы. Аномалия низко- и среднеконтрастная. Максимальные абсолютные содержания ведущих элементов составляют: Rb – 0,004 %, Ba – 0,01 %, MnO 0,12 %, Zr – 0,005 % (глинистый доломитистый известняк, скв. Н2-325, пр. 6, глубина 105,8–111 м).

В табл. 2 содержания SiO₂ (%), CaO (%), V, Cr, Ni, Zn, Sr, Zr, Ba, Pb и Li мкг/г выделены пиковые значения по элементам в хорошо сформировавшихся пластах-коллекторах девон-карбона.

Участок характеризуется хорошо дренируемыми карбонатными отложениями, залегающими на карбонатном цоколе и перекрытыми долеритами. Значения оксидов указывают на цементный размыв, а широкие значения Ba и металлов – на их выпадении из вмещающих пород, обогащенных гидротермами тектонического разлома, вероятно, разноэтапного.

Участок НЗ

Участок расположен в непосредственной близости от базы вдоль прогнозируемого продолжения в СВ направлении зоны динамического влияния Айхальского рудоконтролирующего разлома.

В отдельных скважинах в верхней части разреза отложений нижнего палеозоя отмечаются коры выветривания, представленные глинисто-железистым материалом бурого цвета, карбонатными породами, интенсивно пропитанными гидроокислами железа, с реликтами первичных структурно-текстурных особенностей. Выявленные коры выветривания, как правило, приурочены к верхним относительно пологим частям локальных палеовозвышенностей в рельефе кровли карбонатного цоколя, построенном по остаточным мощностям от кровли олдондинской свиты (геофизический пласт № 7). В структурно-тектоническом отношении участок проведения работ располагается в пределах пересе-

чения зоны динамического влияния Айхальского рудоконтролирующего разлома северо-восточного простирания и его предполагаемого продолжения с зоной динамического влияния рудоконтролирующего разлома северо-западного простирания. По комплексу геолого-геофизических данных на территории участка в верхней части осадочного чехла выделяются разрывные нарушения северо-западного и северо-восточного простирания. В геологических разрезах разрывные нарушения пространственно сопряжены с локальными неоднородностями: отмечаются резкое изменение мощностей интрузивных пород трапповой формации, перепад высотных отметок кровли пород карбонатного цоколя и геофизических пластов внутри него, отторгнутые блоки терригенных пород. По геохимическим данным в пределах участка НЗ ранее были выделены аномалии полиметаллической и сидерофильной групп:

1. Аномалии полиметаллического формационного типа. Выделены 2 аномалии: ГХА-111/21, ГХА-112/21, расположенные в верхней части терригенно-карбонатного цоколя. Ведущие элементы представлены S(10,36), Zn(5,19), Cu(4,65), As(4,10). Аномалии низко-, средне- и высококонтрастные. Максимальные абсолютные содержания ведущих элементов составляют: S – 0,57 %, Zn – 0,008 %, Cu – 0,008 %, As – 0,003 % (глинистый известковистый доломит, скв. НЗ-141, пр. 6, глубина 129–132 м). Поискового интереса выделенные аномалии не представляют и классифицируются как зоны рассеянной минерализации.

2. Аномалии группы сидерофильных элементов. Зафиксировано 6 аномалий: 1 площадная (ГХА-113/21), 2 точечные (ГХА-114/21, ГХА-115/21), расположенные в верхней части терригенно-карбонатного цоколя, и 3 точечные аномалии (ГХА-116/21, ГХА-117/21, ГХА-118/21) в подошвенных горизонтах каменноугольных отложений. Ведущие элементы представлены Dy(13,81), MnO(12,36), Fe₂O₃(11,16) при участии Pb, P₂O₅, Na₂O, Ni, Ga, Co, Sc, V, Yb Zn. Аномалии низко-, средне- и высококонтрастные. Максимальные абсолютные содержания ведущих элементов составляют: Dy – 0,003 %, Fe₂O₃ – 43,27 % (кора выветривания по карбонатным породам, скв. НЗ-142, пр. 2, глу-

бина 109 м), MnO – 1,04 % (кора выветривания по карбонатным породам, скв. НЗ-143, пр. 2, глубина 1,9 м).

3. Аномалии предположительно полиметаллического генезиса. Выделено 2 аномалии (ГХА-119/21, ГХА-120/21) в верхней части терригенно-карбонатного цоколя. Элементы-индикаторы представлены Mo(19,34), Ni(10,03), Er(8,73), TiO₂(8,42), Zn(6,85), Cr(6,20) при участии Co, Cu, Pb, V, Nb, As, Zr, La, SiO₂. Nb присутствует в составе аномалии ГХА-120/21, величина коэффициента контрастности – 3,51 единиц. Аномалии низко-, средне- и высококонтрастные. Максимальные абсолютные содержания ведущих элементов составляют: Mo – 0,004 %, Ni – 0,03 %, Cr – 0,04 % (известково-доломитовый глинистый мергель, скв. НЗ-144, пр. 9, глубина 130,3–135,3 м), Er – 0,001 %, TiO₂ – 2,88 %, Zn – 0,03 % (известково-

доломитовый глинистый мергель, скв. НЗ-145, пр. 8, глубина 112,7–114,5 м). По результатам геохимических исследований для дальнейшего изучения рекомендуется как наиболее перспективная аномалия ГХА-120/21. Точечные аномалии ГХА-119/21, ГХА-120/21, выделенные по результатам химического опробования пород карбонатного цоколя скважин, пространственно приурочены к структуре «трапповое окно» в узле пересечения разрывных нарушений в верхней части осадочного чехла северо-восточной, северо-западной и субмеридиональной ориентировок в зоне пересечения предполагаемого продолжения в северо-восточном направлении Айхальского рудоконтролирующего разлома с рудоконтролирующим разломом северо-западного простирания. Данные химического опробования предыдущих изысканий отсутствуют.

Таблица 3. Результаты литогеохимического анализа из выборки скважин на исследуемой территории НЗ (анализ выполнен в ЦАЛ)

Скв.№	Интервал пробы		Стратиграфия	Литология	SiO ₂ %	CaO %	Cr мкг	Co мкг	Ni мкг	Zn мкг	Sr мкг	Zr мкг	Ba мкг	Nd мкг	Pb мкг	Li мкг
НЗ-71	80,5	85,5	spQIII-hb	Карстовые образования в известняках	13,753	44,988	22,052	5,757	18,486	24,75	592,78	21,31	88,3	10,766	11,68	11,23
НЗ-72	109,9	111,1	spQIII-hb	Карстовые образования в известняках	77,66	1,07	80,136	13,1	71,702	36,29	76,659	119,2	375,02	24,452	40,17	57,59
НЗ-73	126	127	spQIII-hb	Карстовые образования в известняках	10,396	47,131	19,822	2,075	9,0538	0	558,38	7,119	19,93	1,5857	5,785	4,125
НЗ-74	137	138,5	spQIII-hb	Карстовые образования в известняках	8,804	42,966	24,927	4,316	13,035	32,4	595,53	20,46	56,653	2,789	10,87	6,867
НЗ-75	18,8	19,6	spQIII-hb	Карстовые образования в известняках	11,669	45,352	30,878	5,098	11,04	33,36	506,77	34,22	60,749	4,4985	9,115	12,45
НЗ-76	93,4		kvD3-C1	Кора выветривания по карбонатным породам	52,45	0,8293	50,793	41,96	171,52	242,3	215,27	109,2	281,4	48,479	22,93	136,5
НЗ-78	114,2		kvD3-C1	Кора выветривания по карбонатным породам	20,18	0,8013	14,837	89,86	68,118	645,2	68,898	46,04	302,4	14,326	116,5	10,3
НЗ-79	69,2		kvD3-C1	Кора выветривания по карбонатным породам	44,37	2,191	94,741	21,95	118,03	131,8	96,31	98,08	204,65	35,433	80,31	74,92
НЗ-80	44,7		kvD3-C1	Кора выветривания по карбонатным породам	47,41	0,7636	69,388	108,9	205,24	223	53,704	109,5	241,73	27,856	108,9	38,49
НЗ-82	64,2		kvD3-C1	Кора выветривания по карбонатным породам	16,61	0,7263	24,817	231,1	184,71	1517	40,818	31,65	76,53	50,341	49,83	23,15

В табл. 3 SiO₂ (%), CaO (%), Cr, Co, Ni, Zn, Sr, Zr, Ba, Nb, Pb, Li мкг/г выделены пиковые значения в хорошо сформированных пластах-коллекторах девон-карбона.

Также участок характеризуется хорошо дренируемыми карбовыми отложениями, залегающими на карбонатном цоколе и перекрытыми долеритами, но в более восточной части СГП – между диатермовой терри-

торией (в частности, вокруг малоразмерной диатермы). По высоким концентрациям редких металлов и вмещающих пород минерализация носит ярко выраженный гидротермальный характер. На данном участке рудопроявления отмечены в широких интервалах: от первых метров до забоя скважин в трещинно-жильных нарушениях массива пород.

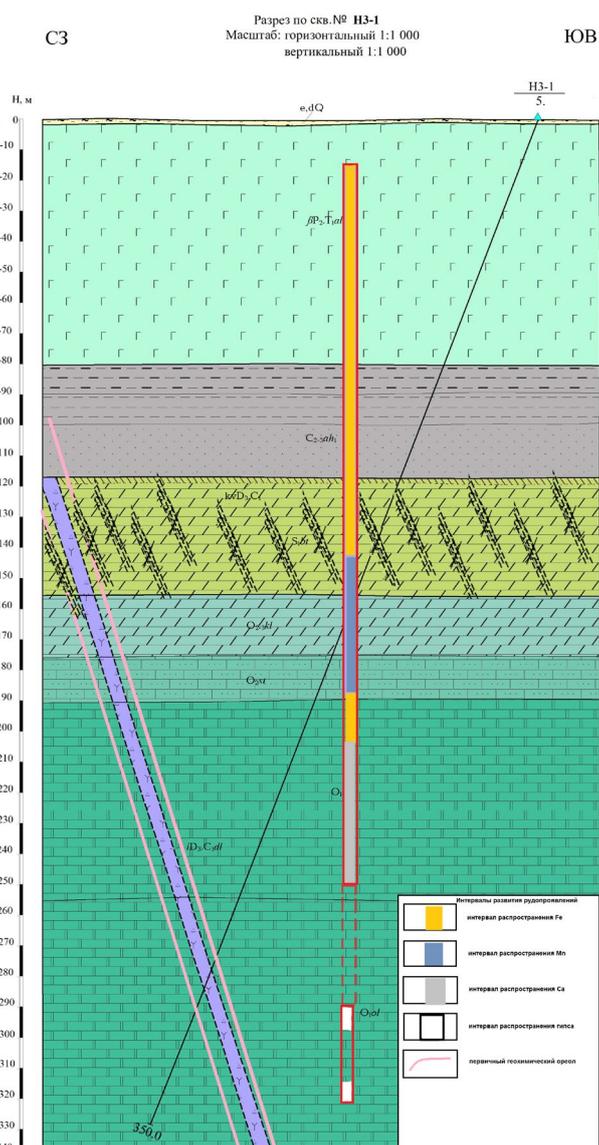


Рис. 3. Схематичное распространение зафиксированной при передокументации минералопроявлений "скв. № НЗ-1, вскрывшей жилу Каротажную (разрез по Хабибрахмановой А.Р.)

Все 3 рассмотренных участка располагаются на склоновых площадках речной долины р. Сохсолох, что является местным базисом эрозии для межмерзлотных и поверхностных вод – главных агентов переноса растворённых пород. Общими характеристиками участков являются: верхний интрузивный водоупор, ограничивающий экзогенное

воздействие на девон-карбонатные пласты; развитие пустот и процессов по их заполнению материалом в вышеобозначенных пластах и цоколе карбонатного комплекса в относительных глубинах, преимущественно от 100 до 160 м; зафиксированные каверно-трещинные формы имели моноклиальную направленность. По полученным и обрабо-

таным данным можно выдвинуть предположение о том, что:

– в равноприведённых условиях коллектор, расположенный между кровлей интрузива долеритов и карбонатно-терригенной подошвы, являет собой идеальный «геохимический транзит». Характеристика «равноприведённый» подразумевает площадное распространение зоны кор выветриваний; объём и скорость потоков поземных вод, а также пониженный пьезоуровень в «ловушке» для стока;

– в условиях активной динамической зоны пласты коры выветривания на карбонатном цоколе под перекрывающими долеритами будут формировать карстовые отложения. А также будет осуществляться ступенчатая реакция по замещению продуктами разрушения порово-трещинных пластов с разрывными нарушениями в корях выветривания, – полное заполнение пласта переотложениями до смещения УПВ.

Заключение

В Западной Якутии, в частности на рассматриваемом Далдыно-Алакитском поле, широко распространены древние (перекрываемые верхними отложениями) позднедевонско-раннекаменноугольные (особенно) и средне-позднетриасовые коры выветривания. [3]. Но происходит также процесс современного корообразования, выветривания, связанный с экзогенным генезисом и увеличением мощности в настоящем. Для активного осадконакопления необходимо тектоническое поднятие территории. Нередко в этих *трещинно-жильных* условиях возникают турбулентные течения с большими дебитами, наполненные разрушенным материалом, содержащие до 20–30 % веществ обломочной природы.

Трещинам свойственна частая извилистость и ветвление. Являясь эпигенетическими, они перенимают ориентировку от структурно-текстурных особенностей пород. Тогда как трещины тектоногенеза характеризуются ортоориентированными нарушениями деформаций, пликативов и дизъюнктивов.

На определенной стадии развития карста разрушение породы начинает количественно преобладать над процессами растворения –

образуются рыхлые карбонатные продукты разрушения. Но из-за пластичности этих пород ограничена внутренняя циркуляция вод, и наиболее активно процесс протекает на контакте с вмещающими породами, где циркуляция вод интенсивнее, и по редкой неравномерной системе трещин. Развитие КСП усиливается в зонах повышенной деформации и вдоль крупных трещин, обладающих высокой транзитной способностью, особенно на линии контакта двух субупорных массивов; в литологической ловушке канала, зон тектонических нарушений. Они являются обуславливающим фактором направления потока флюидов, который зависит в обычных условиях от плотностного и напорного градиента, и могут приводить к вертикальной циркуляции обогащённых минералами подземных вод.

Процесс КСП будет продолжаться до местного базиса эрозии, зеркала уровня подземных вод или массивного регионального водоупора. Так, в зоне застойного и затруднённого водообмена и повышенной минерализации на «нижних гидрогеологических этажах» КСП тоже претерпевает метаморфизацию – в процесс выпадения в трещины и каверны солей, кальцита и гипса при геодинамических предпосылках.

Итак, КСП на исследуемой территории имеет следующие свойства: 1) структурные – превалирование вертикальных каналов транзита на глубинах ниже УПВ и БЭ и выше – пологих систем коллекторов; 2) региональный экран, субводоупор с редкими «окнами», представленными мощными интрузивами базитового состава, перекрывающими верхнепалеозойские отложения; 3) зафиксированные широкие проявления гидротермальных минералообразований, не характерных для зон аэрации; 4) активнейшее участие тектоно-магматических процессов D_3-T_1 , оказавших существенное влияние на строение, процессы региона и осаждение из гидротерм рассеянных элементов в $\sim T_1-T_2$, которые также могли оказывать метасоматические воздействия на вмещающие вокруг каналов породы (окварцевание, перекристаллизацию, доломитизацию), где температуры должны достигать порядка 180–360 °С и более.

В карбонатно-терригенных подинтрузивных породах при пересмотре и передокумен-

тации кернового материала из скважин района исследований повсеместно зафиксированы вторичные минералопоявления, которые обильно оседают в пластово-каверновых «ловушках» и зонах дробления, зеркалах скольжений и застойных пластово-жильных коллекторах. Однако до сих пор для этих толщ не были отмечены признаки эпигенетического окисления. Также присутствие сульфатов явно указывает на окислительный сернокислый состав подземных вод. Этот факт свидетельствует о том, что содержащие кислород и сульфат-ион подземные воды на этом и других выступах встречали на своем пути кальциевую карбонатную среду, в которой отлагался гипс (Игнатов и др., 2021).

Вышеописанные свидетельства дают основания для предположения, что при тектоно-магматической активизации и широких покровных интрузивах (играющих роль водоупора) в карбонатно-терригенных породах O–D протекал многофазовый гидротермальный минералогенезис, приведший к обогащению вмещающих пород рассеянными элементами в T₁–T₂, впоследствии осложнённых криолизацией.

На возраст ореолов рассеянной минерализации указывают следующие факты: 1) вскрышные породы на долеритовой кровле слабо минерализованы относительно тех же подстилающих карбонатно-терригенных пород; 2) вскрытые скважинами единичные отложения ахтарандинской свиты перми с весьма слабой концентрацией рассеянных элементов (уч. Сох-й); 3) в подстилающих долериты терригенных породах, имеющих мощность >40 м, наиболее насыщена элементами нижняя часть их фации, контактирующая с карбонатным цоколем; 4) исключением из представленных наблюдений являются придиатермовые участки, в которых и перекрывающие породы MZ и KZ имеют представительные концентрации рассеянных элементов.

В породах скважин, не вскрывших коллекторный водоносный горизонт, имеют место вторичные минералопоявления. Трещины, являясь эпигенетическими, перенимают ориентировку от структурно-текстурных особенностей пород. Каналы и нарушения различного генезиса влияют на водопроницаемость пород пласта-коллектора. Развитие карстово-солифлюкционного процесса уси-

ливается в зонах повышенной деформации и вдоль крупных трещин. Карстово-солифлюкционный процесс будет продолжаться до местного базиса эрозии, зеркала уровня подземных вод или массивного регионального водоупора. На «нижних гидрогеологических этажах» также происходит метаморфизация КСП. На исследуемой территории КСП имеет свойства: превалирование горизонтальных каналов транзита на определенных глубинах, региональный экран, широкие проявления гидротермальных минералопоявлений и активное участие тектоно-магматических процессов.

Библиографический список

Гапотченко П.И., Морозова Н.Е. Тектоника и магматизм севера Якутской алмазоносной провинции по результатам аэрогеофизических исследований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 5–7 апреля 2017 г.: в 2 т. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. Т. 2. С. 432.

Горев Н.И. Прогнозный мониторинг алмазоперспективных территорий и площадей Сибирской платформы с целью обеспечения перспектив и оперативного планирования геологоразведочных работ АК АЛРОСА (объект «Прогнозный-3»). Мирный, 2009.

Зинчук Н.Н. Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдястых кимберлитов // Вестник Пермского университета. Геология. 2023. Т. 22. № 1. С. 32–50.

Зинчук Н.Н. Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // Руды и металлы. 2022. № 2. С. 100–120. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10013.

Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Роль пликативных структур как прогнозных критериев на алмазоносные кимберлиты в Алакит-Мархинском поле // Руды и металлы. 2021. № 3. С. 6–13. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10014.

Игнатов П.А., Зарипов Н.Р., Толстов А.В., Колесник А.Ю., Мальцев М.В. Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудовмещающей структуры кимберлитов Сюльдюкарского поля Якутии // Руды и металлы. 2021. № 1. С. 93–105. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10006.

Коробков И.Г., Никулин И.И., Коробков Я.С., Лыткин К.А. Базиты вулканоструктур Восточной

окраины тунгусской синеклизы // Вестник ВГУ. Серия: геология. 2017. № 4.

Салихов Р.Ф., Толстов А.В., Салихова В.В., Кузьменок А.Н. Реконструкции палеорельефа при

поисках погребённых кимберлитовых тел на закрытых траппонасыщенных территориях (на примере Алакит-Мархинского поля) // Руды и металлы. 2020. № 1. С. 39–50.

Features of the Karst-Solifluction Processes in Rocks of the Sokhsolokhskiy Graben Trough

P.V. Nekrasov

Vilyuyskaya Geological Exploration Expedition PJSC «ALROSA»

3 Almazodobytchikov Hwy., Aykhal 678190, Russia. E-mail: pavel.nekrasoff2018@yandex.ru

The article considers the features of the formation of karst-solifluction reservoirs in the eastern part of the Sokhsolokhskiy graben-shaped Trough, and traces the stages of their development. The spatial and genetic relationship of micro-components, elements of "traps" of synformal structures, depressions with manifestations of the hydrofactor and features of the geodynamic development of the platform in the Devonian-Triassic Epoch has been established. The main relationship of spatial placement of karst reservoirs with deflections and depressions, and hydrothermal ore mineralization was revealed.

Key words: *Dynamic zone of the formation; karst-solifluction process; subintrusive karst deposits; "Logging" vein; halos of scattered mineralization; Sokhsolokhskiy graben-shaped trough.*

References

Gapotchenko P.I., Morozova N.E. 2017. Tektonika i magmatizm severa Yakutskoy almazonosnoy provintsii po rezultatam aerogeofizicheskikh issledovaniy [Tectonics and magmatism of the north of the Yakut diamondiferous province according to the results of airborne geophysical studies]. In: Geology and mineral resources of the North-East of Russia : materials of the VII All-Russian scientific and practical conf., Yakutsk, NEFU Publishing House, Vol. 2, p. 432. (in Russian)

Gorev N.I. 2009. Prognoznyy monitoring almazoperspektivnykh territoriy i ploshchadey Sibirskoy platformy s tselyu obespecheniya perspektiv i operativnogo planirovaniya geologorazvedoachnykh rabot AK ALROSA (obyekt Prognoznyy - 3) [Predictive monitoring of diamond potential territories and areas of the Siberian platform in order to ensure the prospects and operational planning of exploration activities of ALROSA (object "Predictive-3")]. Mirnyy, Open file report. (in Russian)

Zinchuk N.N. 2023. Osobennosti gidrotermalnogo i gipergennogo izmeneniya slyudistykh kimberlitov [Specific Features of Hydrothermal and Hypergene Alterations of Micaceous Kimberlites]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 22(1):32-50. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.22.1.32

Zinchuk N.N. 2022. Kory vyvetrivaniya i ikh rol v formirovaniy postkimberlitovykh osadochnykh tolshch [Weathering crusts and their role in the formation of post-kimberlite sedimentary strata]. Rudy i metally. 2:100-120. (in Russian) doi: 10.47765/0869-5997-2022-10013.

Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. 2021. Rol plikativnykh struktur kak prognoznykh kriteriev na almazonosnye kkimberlity v Alakhit-Markhinskom pole [The role of plicative structures as predictive criteria for diamond-bearing kimberlites in the Alakhit-Markhinskoye field]. Rudy i metally. 3:6-13. (in Russian) doi: 10.47765/0869-5997-2021-10014.

Ignatov P.A., Zaripov N. R., Tolstov A.V., Kolesnik A.Yu., Maltsev M.V. 2021. Gidrotermalnaya mineralizatsiya v osadochnykh porodakh kembriya kak indikator rudo-vmeshchayushchey struktury kimberlitov Syuldyukarskogo polya Yakutii [Hydrothermal mineralization in Cambrian sedimentary rocks as an indicator of the ore-bearing structure of kimberlites of the Syuldugar field of Yakutia]. Rudy i metally. 1:93-105. (in Russian) doi: 10.47765/0869-5997-2021-10006.

Korobkov I.G., Nikulin I.I., Korobkov Ya.S., Lytkin K.A. 2017. Bazity vulkanostruktur Vostochnoy okrainy tungusskoy sineklizy [Basites of volcano structures of the Eastern margin of the Tunguskaya syncline]. Bulletin of the VSU. Series: Geology. № 4 (in Russian)

Salikhov R.F., Tolstov A.V., Salikhova V.V., Kuzmenok A.N. 2020. Rekonstruktsiya paleorelefa pri poiskakh pogrebennykh kimberlitovykh tel na zakrytykh trapponasyshchennykh territoriyakh (na primere Alakit-Markhinskogo polya) [Reconstructions of paleorelief in the search for buried kimberlite bodies in closed trap-saturated territories (on the example of the Alakit-Markhinsky field)]. Rudy i metally. 1:39–50. (in Russian)