



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Российский государственный геологоразведочный университет имени

Серго Орджоникидзе»

(МГРИ)

*На правах рукописи
Еременко*

Геологоразведочный факультет

Кафедра геологии месторождений полезных ископаемых

Еременко Руслан Умарович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИЙ СКАНДИЯ В НАКЫНСКОМ
АЛМАЗОНОСНОМ ПОЛЕ И ДРУГИХ КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОЛЯХ
ЯКУТИИ**

Специальность: 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Научный руководитель
профессор МГРИ,
доктор геолого-минералогических наук
Игнатов П.А.

Москва 2025

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНОВ	9
Глава 2 ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СКАНДИЯ В ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩАХ МАЛО-БОТУОБИНСКОГО, СРЕДНЕ- МАРХИНСКОГО И БЫГАТТИНСКОГО АЛМАЗОНОСНЫХ РАЙОНОВ ЯКУТИИ.....	31
Глава 3 РУДНЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СКАНДИЯ И СОПУТСТВУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ В ДРЕВНИХ КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ НАКЫНСКОГО И СЮЛЬДЮКАРСКОГО АЛМАЗОНОСНЫХ ПОЛЕЙ.....	52
Глава 4 ВЕРОЯТНЫЕ ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ СКАНДИЯ В ПОРОДАХ ДРЕВНИХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ	63
Глава 5 НАРУШЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПОМОРФНЫХ УЛЬТРАБАЗИТАМ, БАЗИТАМ И КАРБОНАТИТАМ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ НИЖНЕГО ПАЛЕОЗОЯ, ВМЕЩАЮЩИХ КИМБЕРЛИТЫ ЯКУТИИ.....	71
Глава 6 Практические рекомендации	85
Заключение	88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	90

Введение

Актуальность проблемы. Активное развитие сферы высокотехнологичного производства, серьёзные вызовы в сфере безопасности и необходимость развития арктических регионов являются приоритетами России. Открытие месторождений такого элемента как скандий в Западной Якутии может внести вклад в развитие страны и, в частности, арктических регионов, так как он используется в аэрокосмической и оборонной промышленности, при производстве прочных сплавов алюминия керамики, электроники и в 3D-печати.

Необходимость расширения минерально-сырьевой базы Sc указана в документе «Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 августа 2022 г. № 2473-р.», согласно которому скандий входит в «прилагаемый перечень основных видов стратегического минерального сырья» и закреплён за категорией «редкие металлы». По данному документу обеспечивается приоритетное финансирование за счёт средств федерального бюджета работ по воспроизводству минерально-сырьевой базы дефицитных видов стратегического минерального сырья.

В Якутии имеется месторождение Томтор, в котором скандий может добываться как попутный компонент в коре выветривания [59]. При этом вопрос о вероятном наличии комплексных скандий-редкоземельных месторождений в известных и разрабатываемых алмазоносных полях Якутии ранее не поднимался.

Рассматриваемая тема диссертации была поддержана Российским Научным Фондом по результатам конкурса 2022 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами». Под руководством П.А. Игнатова был успешно выполнен молодёжный грант №23-27-00280 «Условия образования промышленных концентраций скандия в древних корах выветривания Западной Якутии».

Целью данной работы является выявление геологических и физико-химических условий образования, а также локализация вероятных промышленных концентраций скандия в алмазоносных районах Западной Якутии.

Основные задачи исследования:

- 1) провести обзор изученности условий концентраций скандия в разных геологических формациях, в том числе, в древних корах выветривания;
- 2) выделить черты геологического строения и истории развития Западной Якутии и охарактеризовать возможность концентрации скандия в древних корах выветривания;

- 3) установить геологические формации с геохимической специализацией на скандий в Западной Якутии, которые могли быть его источником в корях выветривания;
- 4) охарактеризовать возможное влияние впервые описанных для алмазоносных районов зон пластового окисления (ЗПО) в формировании повышенных концентраций Sc;
- 5) проанализировать имеющиеся признаки промышленных концентраций скандия в древних корях выветривания Западной Якутии и локализовать площади перспективные для обнаружения комплексных скандий-редкоземельных месторождений.

Фактический материал и личный вклад автора. Выполнение таких задач было бы невозможно без огромного фактического материала. В основу диссертации легли данные геохимического опробования керна поисковых скважин, полученные в процессе геологоразведочных работ компании АК АЛРОСА (ПАО). Имеются базы данных по Накынскому (46763 РФА анализа) и Слюдякарскому (4081 РФА анализ) полю, а также по поисковым площадям Улахан-Курунг-Юрях (1578 РФА анализов) и Бестях (2437 ICP-AES и 352 РФА анализа) в Мало-Ботуобинском районе Западной Якутии. РФА-анализы выполнены в Центральной аналитической лаборатории ВГРЭ с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра S8 TIGER "BRUKER" (Германия), анализ ICP выполнялся на приборе iCAP 6300Duo производства Thermo Scientific (США). Статистическая обработка данных анализов проводилась автором в программе Excel. На основании этих анализов, а также картографического материала создана база данных в геоинформационной системе QGIS. Помимо имеющихся анализов проб, автором лично отобраны пробы на определение возможной скандиености на участке Бестях Мирнинского поля и участке Озерный Накынского поля. Проведён корреляционный анализ скандия с рядом других элементов в рассматриваемых районах и теоретически определена вероятная минеральная форма нахождения Sc в дяхтарской свите на основании петрохимических модулей. Автором изучен керн поисковых скважин разрезов нижнего и верхнего палеозоя, включая горизонты древних кор выветривания, в отмеченных площадях Мало-Ботуобинского района и Накынского поля в объеме 24 000 погонных метров.

Научная новизна. На основании полученных данных, получены принципиально новые результаты. Во-первых, впервые выделены предпосылки формирования рудных концентраций скандия, а также вероятных попутных церия, лантана, иттрия, неодима, кобальта и никеля в древних корях выветривания каменноугольного и триас-юрского возраста в Накынском и Слюдякарском алмазоносном поле.

Во-вторых, впервые установлена зона пластового окисления в терригенных угленосных породах перми и трещинного окисления в породах кембрия в Мало-Ботуобинском алмазоносном районе и обосновано её значение в формировании концентраций ванадия и скандия.

В-третьих, в процессе поиска различных методов переноса скандия, разработаны новые приёмы выделения ближнего оклотрубочного пространства кимберлитов на основе анализа коэффициентов корреляции фоновых содержаний определённых элементов во вмещающих породах.

Практическая значимость. Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы компанией АК АЛРОСА (ПАО) для диверсификации ресурсной базы полезных ископаемых, а также для дополнительного и долгосрочного развития городов и рабочих посёлков арктической зоны РФ. Также может быть повышена результативность геохимических методов поиска кимберлитовых тел на уже исследованных районах.

В работе доказываются следующие защищаемые положения:

1. В Мало-Ботуобинском, Средне-Мархинском и Ыгыаттинском алмазоносных районах Якутии имеются перспективы промышленных концентраций скандия двух типов: в древних корях выветривания и впервые выявленных зонах выклинивания пластового окисления угленосных пермских пород.
2. Впервые установлены признаки и перспективные геохимические ореолы повышенных концентраций скандия и сопутствующих элементов в Сюльдюкарском и Накынском алмазоносных полях в корях выветривания каменноугольного и триас-юрского возраста.
3. По расчётам петрохимических модулей и корреляционных связей Sc с другими элементами обоснованы две формы его высоких концентраций в древних корях выветривания: сорбционная в монтмориллоните и изоморфная в тонкозернистом акцессорном ванадий-скандиеносном титаномagnetите.
4. Выявлены нарушения корреляционных связей фоновых содержаний V, Cr, Co, Ni, Zr, Zr и Sc в осадочных породах нижнего палеозоя, вмещающих кимберлиты Накынского и Сюльдюкарского алмазоносных полей. Они могут быть использованы в качестве нового поискового признака кимберлитов на закрытых поисковых площадях.

Публикации. На 1.01.2025 г. по теме диссертации опубликовано 8 статей в следующих изданиях, в т.ч. 8 рекомендуемых ВАК РФ: «Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология» (Web of Science, Scopus, RSCI, РИНЦ, «Белый список»), Геология рудных месторождений (Scopus, RSCI, РИНЦ), Горный журнал (РИНЦ, ядро РИНЦ, ВАК, Scopus), Известия высших учебных заведений. Геология и разведка (ВАК, РИНЦ), Отечественная геология (ВАК, РИНЦ), Природные ресурсы Арктики и Субарктики (RSCI, РИНЦ, «Белый список»).

Апробация диссертации. Помимо статей, автором была проведена апробация материала с публикацией тезисов и докладами на следующих конференциях:

- Еременко Р.У., Игнатов П.А., Илларионов П.Н. Возможности использования анализа фоновых содержаний Cr, V, Co, Ni, Zr и Zr во вмещающих породах нижнего палеозоя для поисков алмазоносных кимберлитов / Рудная школа ЦНИГРИ Молодежная научно-образовательная конференция «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов — от прогноза к добыче» 12-14 февраля 2025. Доклад.

- Еременко Р.У., Игнатов П.А., Илларионов П.Н. Петрохимическая характеристика пород, содержащих скандий в Накынском алмазоносном поле. Доклад и тезисы всероссийской научно-практической конференции «Геохимические методы поисков как инструмент обнаружения прямых признаков месторождений стратегических видов минерального сырья» 28 ноября 2023 г.

- Еременко Р.У., Игнатов П.А., Илларионов П.Н. Петрохимическая характеристика скандиеносных пород дяхтарской свиты триас-юрского возраста Накынского кимберлитового поля Якутии. Доклад и тезисы в Т. 1 : Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле: геология, геотектоника, геодинамика, региональная геология, палеонтология/Издательство Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 2023. С. 27-31.

- Игнатов П.А., Еременко Р.У., Васильев А.П., Илларионов П.Н. Анализ геохимического фона осадочных пород нижнего палеозоя как показатель перспектив при проведении алмазо-поисковых работ в Якутии. Вторая научно-практическая конференция «Актуальные проблемы поисковой геологии» 19.11.2024 - 21.11.2024 ФГБУ «ВИМС», г. Москва, Старомонетный пер. д.31.

- Игнатов П.А., Еременко Р.У., Васильев А.П., Мальцев М.В., Овчинников И.М. Проявления стратегических видов полезных ископаемых (Cu, Co, Ni, EPG, Sc, V, REE, графит, углеводороды) в Мало-Ботуобинском, Средне-Мархинском и Ыгыаттинском алмазоносных районах Якутии Т.1: Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле: геология, геотектоника, геодинамика, региональная геология, палеонтология/ М.: Издательство Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 2023. С. 39-43.

- Игнатов П.А., Еременко Р.У., Васильев А.П., Илларионов П.Н. Анализ геохимического фона осадочных пород нижнего палеозоя как показатель перспектив при проведении алмазо-поисковых работ в Якутии Вторая научно-практическая конференция «Актуальные проблемы поисковой геологии». М.: ФГБУ «ВИМС». 19-21 ноября 2024 г.

- Игнатов П.А., Еременко Р.У., Акинфиев Н.Н., Толстов А.В., Овчинников И.М., Илларионов П.Н. Нарушение связей Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, V, Zn, Sc в осадочных породах,

вещающих кимберлиты Майского месторождения и Сюльдюкарского проявления алмазов Якутии / Доклад на Смирновских чтениях / Научно-литературный альманах / Гл. ед. В.И. Старостин; Фонд имени академика В.И. Смирнова. – Москва : МАКС Пресс, 2024 – 232 с. (Смирновский сборник – 2024).

- Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазоносной провинции. Доклад и тезисы в сборнике: Проблемы минерагении, экономической геологии и минеральных ресурсов. научно-литературный альманах. Сер. "Смирновский сборник – 2022" Фонд имени академика В.И. Смирнова. Москва, 2022. С. 39-43.

- Еременко Р.У., Игнатов П.А., Овчинников И.М., Толстов А.В. Предпосылки формирования месторождений скандия в Накынском кимберлитовом поле Якутии. Доклад и тезисы в книге: Новое в познании процессов рудообразования. Сборник материалов Одиннадцатой Российской молодежной научно-практической Школы. Тезисы докладов молодых учёных. Москва, 2022. С. 93-96.

Структура и объём работы. Объём диссертации составляет 95 страниц, включая 46 рисунков, 18 таблиц и список литературы, состоящий из 69 опубликованных источников. В структуре работы выделены введение, 6 глав, представляющих собой геологическое описание района, 4 защищаемых положения, практические рекомендации и заключение.

Благодарности. Автор выражает благодарность всему коллективу МГРИ, и, в частности, кафедре геологии месторождений полезных ископаемых, за обучение, помощь и поддержку, особенно научному руководителю – Петру Алексеевичу Игнатову, который на протяжении более чем 5 лет проводил со мной исследования по теме диссертации, вдохновлял, поддерживал и мотивировал.

Автор признателен Толстову Александру Васильевичу и Овчинникову Илье Михайловичу, с которыми получилась плодотворная работа, результаты которой представлены в десяти публикациях, а также Акинфиеву Николай Николаевичу, который провёл термодинамические расчёты по скандию.

Выражаю благодарность Российскому научному фонду (РНФ), который предоставил грант по теме исследования на 2023 и 2024 год.

Особую благодарность выражаю сотрудникам компании АК АЛРОСА (ПАО), без которых было бы невозможно написание диссертации. Всему коллективу Вилюйской ГРЭ за проведение долгих, сложных и дорогостоящих полевых работ и ЦАЛ ВГРЭ, который осуществлял ИСР анализы и дифрактометрию по отобранным лично автором пробам, а также за их огромную работу по проведению РФА и ИСР анализов по десяткам тысяч проб, которые легли в основу

работы. Личную благодарность выражаю Илларионову Павлу Николаевичу за помощь и информационную поддержку. Малькову Александру Анатольевичу, Васильеву Александру Петровичу, Карякину Константину Александровичу, Килижекову Олегу Константиновичу, Двухбратову Дмитрию Андреевичу и Трофимову Андрею Филипповичу благодарен за помощь, сопровождение и поддержку во время проведения полевых работ с компанией АЛРОСА.

За поддержку и внимание к идее поисков месторождений новых видов полезных ископаемых искренне признателен начальнику отдела прогноза Кошкарёву Денису Анатольевичу и главному геологу Желонкину Роману Юрьевичу.

Возможностью заниматься научной работой обязан дедушке, Александру Петровичу и маме, Алёне Александровне, а также своей жене – Александре, которые сделали всё, чтобы автор мог сконцентрироваться на диссертации и писать её в максимально комфортных условиях, чувствую поддержку и заботу.

Глава 1 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНОВ

В работе рассмотрены три алмазоносных района: Мало-Ботуобинский, Ыгыаттинский и Средне-Мархинский. Описание геологии проведено на примере алмазоносных полей и площадей, на которых произведено поисковое бурение на алмазоносные кимберлиты. В связи с этим особое внимание уделено отложениям, представленным до глубины порядка 100 м, которые автор мог лично наблюдать при описании керна.

Краткая геологическая характеристика районов и изученных площадей приведена по материалам проектов и отчетов геологов вилюйской ГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) и имеющихся публикаций [55, 41]

Мало-Ботуобинский район

В Мало-Ботуобинском районе описание стратиграфии приведено на основании поисковой площади Улахан-Курунг-Юрях с участком Локальный (Рис. 1.1) и Бестях (Рис. 1.2). Осадочный чехол имеет мощность около 3 500 м и включает отложения венда, кембрия, ордовика, карбона, перми, юры и четвертичного периода. На глубине до 100 м на рассматриваемых площадях встречаются отложения кембрийской, ордовикской, каменноугольной, пермской, юрской и четвертичной систем.

Кембрийская система. Представлена холомолохской свитой верхнего отдела кембрия (E_{3hl}). Породы холомолохской свиты завершают разрез нижнего палеозоя, согласно перекрывая мирнинскую свиту.

На поверхность в пределах поисковой площади Бестях породы свиты не выходят, однако севернее и южнее в долинах рек они наблюдаются в обнажениях. В пределах поисковой площади Улахан-Курунг-Юрях выходят ОНИ на дневную поверхность на севере, на участке Локальный.

Максимальная глубина залегания поверхности свиты под перекрывающими отложениями, по данным бурения, достигает 165 м на южном фланге площади. Гипсометрические отметки кровли свиты на обнаженных площадях находятся в пределах 190-260 м. Абсолютные отметки кровли имеют достаточно сильные перепады, что объясняется сложным блоковым строением и эродированностью площади.

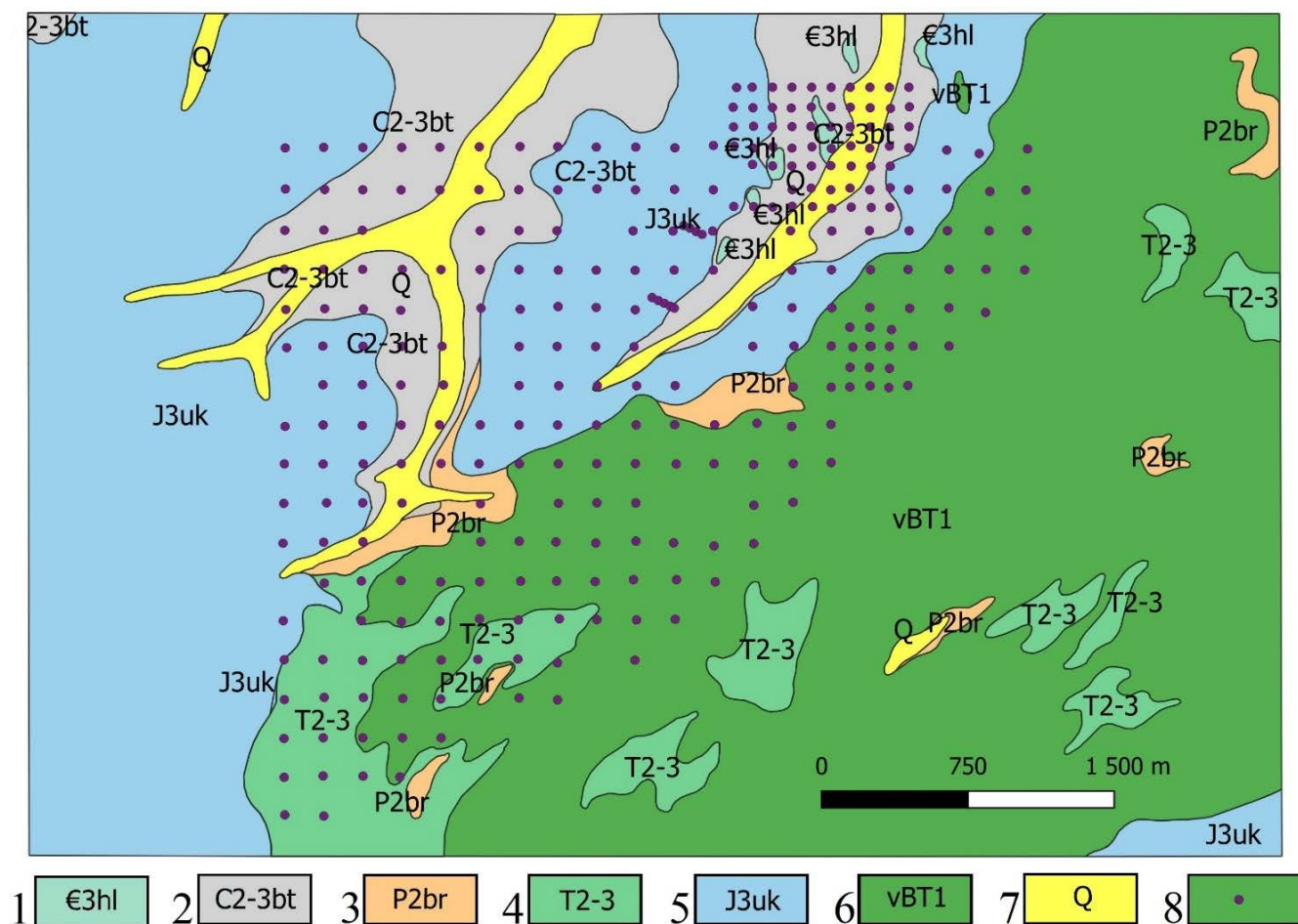


Рис. 1.1 Геологическая карта поисковой площади Улахан-Курунг-Юрях и Локальный (Карта составлена геологами ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) – Ответственный исполнитель Васильев А.П., составил Трофимов А.Ф., Павлов В.Ю., 2019г. с дополнениями автора)

1 – 7 выходы на поверхность: 1 – холмологская свита верхний отдел кембрийской системы, 2 – ботубобинская свита, средний-верхний отдел каменноугольной системы, 3 – боррулойская свита, верхний отдел пермской системы, 4 – триасовая система, средний-верхний отдел, глинисто-щебенистый образования коры выветривания, 5 – укугутская свита, нижний отдел юрской системы, 6 – четвертичные отложения; 7 – долериты и микродолериты ахтарандинского комплекса; 8 – устья скважин

На рассматриваемых площадях свита имеет неполную мощность. По данным ГИС расчетная остаточная мощность свиты определена в пределах – 121,7-230,6 м.

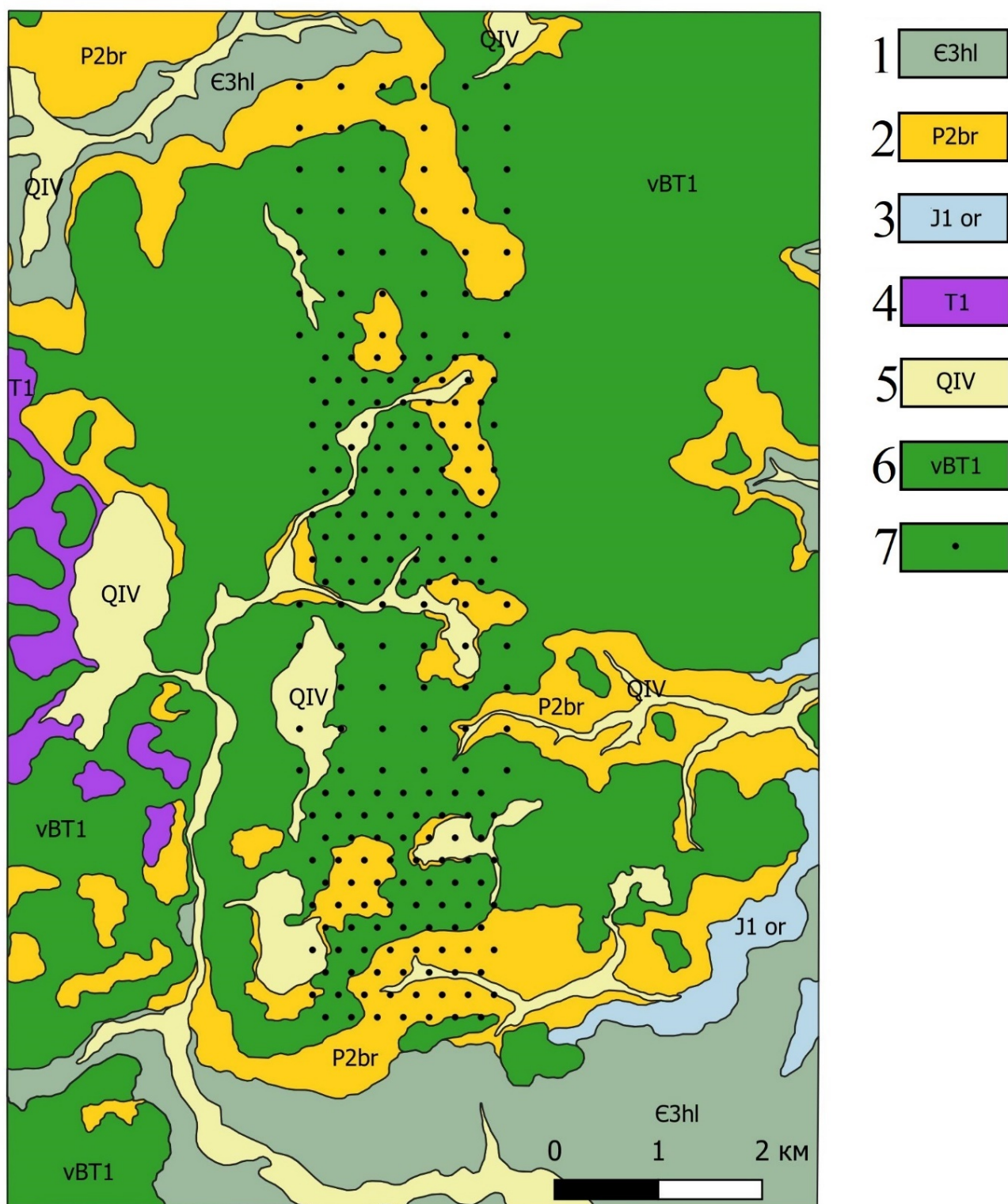


Рис. 1.2 Геологическая карта поисковой площади Бестях (Карта составлена геологами ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) с дополнениями автора)

1 – терригенно-карбонатные породы холомолохской свиты верхнего кембрия, 2 – песчаники боруллойской свиты средней перми, 3 – туфы чичиканской свиты нижнего триаса, 4 – песчаники оруктахской свиты нижней юры, 5 – аллювиальные четвертичные отложения, 6 – триасовые габбро-долериты, 7 – устья скважин

Холомолохская свита сложена преимущественно известковистыми, известковисто-доломитовыми алевролитами (от пелитовых до песчанистых разностей), известняками,

доломитами, мергелями, и переходными между ними разностями. Резкие и постепенные переходы от одних разностей пород к другим создают листовато-тонкослоистое строение. Цвет пород голубовато-серый, зеленовато-серый, серовато-коричневый, красновато-коричневый до сургучно-красного. Залегание пород преимущественно субгоризонтальное, с субпараллельной волнистой слоистостью. Породы в основном слабо трещиноваты; в зонах разломов трещиноватость усиливается до образования зон дробления. В зонах дробления залегание пород меняется до субвертикального. Кроме тектоники, из вторичных постдиагенетических процессов, воздействовавших на породы свиты, отмечаются выщелачивание, сидеритизация (Рис. 1.3), пиритизация (Рис. 1.4), кальцитизация (Рис. 1.5).



Рис. 1.3 Доломитистые алевролиты, а также пласт тяжёлых сидеритизированных с гематитовой рубашкой доломитов на интервале 46-47м. Угол к оси керна 900. Скважина 71,5-240,5 интервал 42-47м

В Непско-Ботуобинской зоне, в которую входит участок Улахан-Курунг-Юрях, находится стратотипический разрез свиты, разделяющиеся на три пачки.

Первая пачка состоит, в основном, из пестроцветных мергелей доломитовых, с прослоями доломитов алевролитистых, алевролитов, аргиллитов, песчаников с линзами и гнездами гипса. Мощность 30-60 м.



Рис. 1.4 Прожилковое метазернистое выделение пирита с ассиметричным размещением вверх по слойку под локальным глинистым экраном. Угол к оси керна 0, ширина от 2мм до 2,5см. Вероятно, отражает поток экранирования сероводорода снизу-вверх. Скважина 73,3-238,5 глубина 53,5м



Рис. 1.5 Крупная друза крупнокристаллического кальцита с пиритом и зеленовато-голубоватыми минералами в пелитоморфных доломитах. Скважина 74,1-220 глубина 108 м

Вторая пачка также пестро окрашена, но более алевроитистая, чем первая пачка, до появления прослоев песчаников. Мощность 50-80 м.

Третья пачка по сравнению с нижележащими пачками более карбонатная, доломитистая, также пестро окрашенная, но преобладают более сероцветные прослои. В целом пачка представлена переслаиванием доломитов алевролитовых, алевролитов и песчаников доломитовых с прослоями мергелей, аргиллитов, конгломератов внутриформационных. Мощность 50-100 м.

Высокая контрастность значений естественной радиоактивности для разных литотипов, слагающих элементарные ритмы (20-22 мкР/ч – алевролиты, 3-10 мкР/ч – известняки), в полной мере находит свое отражение в характере кривых гамма-каротажа, анализ которых позволяет коррелировать отложения холмолохской свиты на сопредельных территориях, т.к. даже при существенных изменениях мощности геофизических пластов, их можно с достаточной достоверностью сопоставлять между собой. По данным ГИС и по литологическим характеристикам в подошве литолого-геофизического пласта выделяется контрастный прослой органогенных или мелкозернистых доломитовых известняков, а в кровле пачка алевроитово-глинистых пород с единичными маломощными прослоями глинистых известняков.

Выявленная в разрезе свиты фауна характеризует аюсоканский, санский и аксайский ярусы верхнего кембрия.

Ордовикская система. Проявлена крайне слабо и представлена маломощными отложениями балыктахской свиты нижнего отдела.

Балыктахская свита (O_1bl) сложена доломитами, доломитами водорослевыми, алевролитами и песчаниками. Общая мощность отложений свиты 130–170 м [4].

Свита распространена на участке Улахан-Курунг-Юрях крайне локально и выделить конкретные места залегания достаточно сложно, однако отложения были отмечены на западе и северо-западе участка. Предположительно данная свита была сильно эродирована во время девонского поднятия Сибирской платформы, форма залегания – линзовидная.

Каменноугольная система. Средний и верхний отдел представлены ботубобинской свитой. Ботубобинская свита (C_{2-3bt}). Отложения свиты на исследуемой территории имеют широкое распространение. Они с размывом залегают на терригенно-карбонатных породах холмолохской свиты. Практически не представлена на поисковой площади Бестях. Выявлены лишь редкие линзы в единичных скважинах. Более полно проявлена на площади Улахан-Курунг-Юрях.

В литологическом составе свиты принимают участие грубообломочные, песчаные и глинисто-алевролитовые породы. Он представлен преимущественно толщей зеленовато-серых, серых мелко-среднезернистых песков слоистой, реже массивной текстуры. Алевролиты и их

глинисто-песчаные разности, как правило, венчают разрезы мелких и крупных седиментационных ритмов. В резко подчиненном количестве присутствуют гравийно-галечные отложения, залегающие в основании ритмов и аргиллиты, угли, венчающие алевролитовые пачки. Количество последних зависит от генезиса осадков, слагающих ритмы. В целом разрез свиты характеризуется резкой латеральной изменчивостью, что характерно для континентального комплекса отложений.

Грубообломочные отложения отмечаются как в нижних частях хорошо выраженных ритмов, так и в виде прослоев в песчаных, реже песчано-алевритовых пачках (Рис. 1.6). Кроме этого, псефитовый материал встречается в песках в виде единичных «плавающих» галек.



Рис. 1.6 Лимонитизированные мелкозернистые песчаники ботубинской свиты (C_{2-3bt}), угол к оси керна 500. Скважина 75,125-213,5 в интервале 12-14 м

Породы имеют смешанный песчано-гравийно-галечный состав, представляющий комплекс русловых осадков. Мощность этого комплекса отложений различна (от 0,1 до 1,5 м). Размер щебнисто-галечного материала обычно составляет 1-3 см, реже 5-7 см. Иногда присутствует галька кварцитов до 20 см и глыбовый материал алевролитов. В составе транзитного материала преобладают кварциты, кварц, кремнистые породы, менее развиты кислые порфиры. Степень окатанности обломочного материала, как правило, не превышает 2-3 класса, изредка достигая 3-4 класса. Сортировка материала плохая, за исключением кварцевых гравелитов. Местные породы представлены терригенно-карбонатными породами нижнего палеозоя и в меньшей степени верхнепалеозойскими алевролитами.

Главную роль в составе свиты играют пески (Рис. 1.6). Окраска песчаной пачки обычно зеленовато-серая, серая, различных оттенков и интенсивности, и зависит от степени увлажненности и характера эпигенетических изменений, вносящих желтоватые и бурые цвета.

В гранулометрическом составе песков преобладают мелкозернистая и среднезернистая составляющие, крупнозернистая появляется в незначительных количествах. Количество алевритовой примеси увеличивается, как правило, вверх по разрезу.

Состав их преимущественно кварц-полевошпатовый, иногда близкий к полимиктовому, за счет увеличения количества темноцветов и слюдистых минералов.

Среди минералов легкой фракции преобладает кварц (46%), полевые шпаты составляют 17%, плагиоклазы не превышают 15%.

В группе минералов тяжелой фракции наиболее распространены группа эпидот (26%), ильменит + магнетит (20%), гранаты (24%), лейкоксены (9%), турмалины (3%).

Глинисто-алевритовые породы слагают верхние части разреза свиты. Цвет пород темно-серый, серый, иногда светло-серый и коричнево-серый. Состав пород меняется в широком диапазоне – от крупноалевритовых до глинистых мелкоалевритовых. Нередко породы содержат песчаную примесь, и при повышении ее количества приобретают переходный песчано-алевритовый состав. Обломочный материал алевритов сложен кварцем и полевым шпатом, в меньшей степени кремнями, присутствует тонкий углефицированный детрит. Связующая масса сложена глинисто-карбонатным и слюдисто-глинистым агрегатом.

Глинистые минералы представлены монтмориллонитом (50-60 %), каолинитом (15-25 %) и гидрослюдой (10-20 %), в подчиненном количестве присутствует хлорит (до 10 %).

Базальные отложения ботубинской свиты являются разновозрастными образованиями флювиальных потоков, со слабо выраженными руслами и блуждающими стрежневыми зонами и отличаются признаками активной среды осадконакопления.

Кровля ботубинской свиты на значительной части площади деформирована интрузиями долеритов или частично срезана борруллойдскими осадками. Возможны случаи полного «выпадения» из разреза отложений свиты, связанное с внедрением мощных интрузий долеритов.

Кроме этого, на современный контур развития отложений свиты оказали воздействие более поздние мощные эрозионные процессы, происходящие в поздней перми и в нижней юре, где осадки ботубинской свиты практически полностью уничтожены аллювиальными отложениями укугутской свиты (J_{1uk}).

Ботубинский коллектор является самым информативным, на участке работ. Он содержит основные концентрации МСА и россыпепроявления алмазов, которые выявлены в базальных горизонтах ботубинской свиты, сложенных преимущественно мелко-среднезернистыми песками и алевритами, с включениями делювиально-пролювиального грубообломочного

материала местных пород. Иногда, базальные горизонты представлены галечно-гравийными и разнозернистыми песчаными осадками, с включениями грубообломочного материала как экзотических, так и местных пород.

В средней и верхней частях разреза свиты, содержание, размеры и сохранность МСА, падают до полного исчезновения.

В конце ботубинского времени произошли стабилизация тектонических и ослабление эрозионных процессов. В хорошо выработанных долинах накапливались пойменные и старичные осадки. С отложениями этого комплекса и связаны основные находки органических остатков.

Пермская система. Верхний отдел представлен боррулойской свитой. Боррулойская свита (P_2br) в пределах площади работ Улахан-Курунг-Юрях широко распространена. Она с размывом залегает на осадочных образованиях ботубинской свиты (C_{2-3bt}), а местами на терригенно-карбонатных породах холомолохской свиты (C_{3hl}). Отложения свиты выходят на дневную поверхность преимущественно в центральной части участка и «окаймляют» траппы долеритов. На участке Бестях отложения свиты широко распространены, но преимущественно вдоль рек.

В наиболее представительных разрезах отложения нижней подсвиты сложены двумя, зачастую неполными элементарными ритмами осадконакопления, построенными по схеме – песчаники-алевролиты-алевролиты углистые. Основной объем (до 80-90 %) в этом ряду занимают песчаники; алевролиты, аргиллиты с прослоями углей присутствуют в резко подчиненном количестве. В отдельных случаях отложения ритмов представлены лишь песчаной частью.

Литологический состав пород залегающих, в основании свиты, весьма разнообразен. В основном это крупнозернистые, реже средне-мелкозернистые песчаники с рассеянной примесью гравийных зерен, с мелкой и средней галькой кварца, кремней, средних и кислых эффузивов.

Пески и песчаники, слагают 80-100 % разреза. Цвет пород серый, светло-серый, желтый, иногда голубовато-зеленовато-серый. Структура песчаников преимущественно разнозернистая с преобладанием средне-мелкозернистых разностей, связующая масса песков – глинисто-алевритовая. Зернистость, как правило, уменьшается вверх по разрезу до появления алевритопсаммитовой и пелито-алевритопсаммитовой структуры. Состав песчаников полевошпатово-кварцевый.

Алевролиты, венчающие ритмы, играют подчиненную роль в разрезе свиты. Представлены они смешанными разностями, содержащими значительную примесь глинистого и песчаного материала, рассеянного как по массе, так и концентрирующегося в виде тонких прослоев. Цвет пород серый, темно-серый до черного. Текстура от массивной до слоистой. Преобладает горизонтальная, полого-наклонная косая однонаправленная слоистость,

обусловленная, в первую очередь, чередованием тонких слоев алевролитов, алевролитов глинистых и тонкозернистых песчаников. В заметном количестве присутствует углефицированный детрит. Связующая масса сложена слюдисто-глинистым материалом.

Вскрытая максимальная мощности боруллойской свиты в пределах площади работ достигает 80,5 м.

Базальные горизонты свиты являются коллекторами кимберлитовых минералов. МСА в боруллойской свите приурочены, в основном, к осадкам, сложенным преимущественно мелко-среднезернистыми песками и алевролитами, с включениями делювиально-пролювиального грубообломочного материала местных пород и экзотических пород. Источником МСА для свиты являются продукты незначительного переотложения ботубинского коллектора.

Возраст свиты определяется положением в разрезе и уверенно датируется как позднепермский, по комплексу растительных остатков отложения свиты отвечают пеляткинскому горизонту Тунгусского бассейна. Палинокомплекс боруллойской свиты характеризуется ассоциацией *Cordaitina* – гинкгоцикадофиты – *Nigrisporites*

Триасовая система. Нижний отдел представлен чичиканской свитой. Чичиканская свита ($T_1\check{c}\check{c}$) развита преимущественно в западной части площади Бестях, не выделяется на участке Улахан-Курунг-Юрях. Представлена в основном, туфами, туффитами, туфопесчаниками базальтоидного состава. С угловым несогласием свита залегает на породах верхнего палеозоя. Общая мощность отложений свиты 0-160 м. [32]

Средний и верхний отдел представлены корами выветривания (T_{2-3}). К образованиям этого возраста относятся коры выветривания, развитые на долеритах, базальтах. Поля развития коры выветривания сохранились от последующих эрозионных процессов в виде реликтов на плоских водораздельных пространствах траптовых массивов.

В пределах рассматриваемой территории сохранилась лишь нижняя зона коры выветривания на долеритах – зона дезинтеграции. Верхняя зона – выщелачивания и гидратации практически полностью смыта.

Нижняя часть зоны дезинтеграции (структурная кора выветривания) сложена разномзернистыми долеритами темно-коричневого, ржаво-коричневого, желтовато-грязно-зеленого цвета, интенсивно трещиноватыми, насыщенными гидроокислами железа и марганца. В составе глинистых продуктов преобладает монтмориллонит, отмечаются хлорит, гидрослюда и галлуазит. С глубиной интенсивность процессов выветривания затухает, породы приобретают цвет и структурно-текстурные особенности материнских неизмененных пород. Мощность нижней подзоны 3,5-5,0 м.

Верхняя часть зоны дезинтеграции сложена щебнем, дресвой выветрелых ржаво-коричневых долеритов с глинисто-песчанистой связующей массой коричнево-желтого, бурого

коричневого цвета, образованной при механическом и химическом разложении не выветрелых разностей. Мощность верхней подзоны составляет 3-5 м.

Общая мощность коры выветривания составляет в среднем 10-15 м. Возраст описываемых образований принимается по положению в разрезе. Отложения коры выветривания перекрываются осадками нижней юры или четвертичными отложениями.

Юрская система. Нижний отдел представлен укугутской свитой (J_{1uk}). Отложения свиты имеют достаточно большое распространение, заполняя линейную эрозионно-тектоническую Сыллагинскую депрессию. Они с размывом залегают на отложениях верхней перми, раннетриасовых интрузиях долеритов, туфогенных образованиях и перекрываются маломощными современными осадками. Выходы на дневную поверхность прослеживаются в центральной и северной части участка Улахан-Курунг-Юрях, а также в краевых частях участка Локальный.

В целом разрез свиты представляет собой типично аллювиальные отложения, для которых характерно ритмическое строение.

В составе свиты преобладают пески с прослоями гравийно-галечных конгломератов, менее развиты глинистые алевролиты и аргиллиты, иногда присутствуют прослои углей. Конгломераты развиты в нижней, реже средней частях разреза свиты. Среди обломочного материала, наряду с кварцем и экзотическими породами, значительную роль играют разноокрашенные кремни, иногда отмечаются обломки окремненной древесины, и в различной степени выветрелые и измененные породы трапповой формации. Прослои алевролитов и аргиллитов имеют подчиненное значение и тяготеют, в основном, к верхней части разреза. Они имеют серую, темно-серую окраску, часто с голубоватым и зеленоватым оттенками. Отмечается горизонтальная, полого-наклонная, линзовидно-волнистая слоистость, подчеркиваемая гранулометрией, цветовыми оттенками и скоплениями углефицированного детрита. Мощность прослоев изменяется от 0,1-0,3 м до 2,0-3,0 м.

Максимальная мощность свиты, вскрытая скважинами – 13,7 м. Возраст свиты датируется по споро-пыльцевым комплексам и флористическим остаткам как плинсбахский.

Четвертичная система. Современное звено (Q_{IV}). Современные отложения пользуются широким площадным распространением на исследованной территории и подразделяются на отложения русел, низких пойм рек, озерно-болотные и элювиально-делювиальные.

Озерно-болотные отложения развиты в изолированных бессточных котловинах на плоских водоразделах, а также в расширенных долинах верховьев ручья Улахан-Курунг-Юрях, образуя мари (верховые болота). Литологически представлены торфяниками с остатками древесины, илами, илистыми суглинками и глинами. Их мощность 1,0-3,0 м.

Элювиально-делювиальные отложения широко распространены на изучаемой территории. Они перекрывают сплошным чехлом переменной мощности водораздельные пространства и склоны. Состав их находится в прямой зависимости от литологического материала пород, на которых они развиты. Мощность этих отложений варьирует от нескольких десятков сантиметров до первых десятков метров у подножья крутых склонов [51].

На исследуемых участках магматизм играл достаточно важную роль как для современного облика района, так и для возможностей исследования. Триасовые траппы создавали достаточно серьезные препятствия как для геофизических методов поиска, так и для поискового бурения.

Ахтарандинский комплекс (vβT1a) представлен недифференцированными и слабо дифференцированными траппами. Мощность пластообразных интрузий варьирует в широких пределах – от нескольких метров до 100 м. Интрузивные образования представлены высокомагнитными долеритами, сильно осложняющими применение геофизических методов для поисков продуктивных кимберлитовых тел. В плане интрузии имеют неправильную форму, слагают возвышенные участки рельефа и залегают в разрезе осадочной толщи или на карбонатных породах нижнего палеозоя. Внедрение пластообразных интрузий траппов происходило, в основном, вдоль межформационной границы нижнепалеозойских и верхнепалеозойских отложений с полным или частичным разрушением информативных осадочных коллекторов алмаза верхнего палеозоя, а также сопровождалось смещением блоков палеозойских пород и их брекчированием во фронтальных областях. Подошву и кровлю часто слагают микродолериты со следами обжига и скарнирования вмещающих пород.

Раннетриасовый возраст долеритов принят на основании того, что они прорывают породы верхнего палеозоя и перекрываются нижнеюрскими осадками. Возраст траппов бассейна среднего течения р. Вилюй (по калий-аргоновому методу) равен 200-300 млн. лет.

В ряде случаев все перечисленные интрузивные породы основного состава, в особенности траппы, выходящие на дневную поверхность в зонах разломов и пониженных частях рельефа, имеют маломощные (до 5 м) зоны выщелачивания, дезинтеграции и гидратации (коры выветривания).

Всего в становлении данных структур принимают участие три основных фазы проявления базитового магматизма: первая – эксплозивно-эффузивная; вторая и третья – интрузивные.

Участки Улахан-Курунг-Юрях и Локальный, расположены в части, где происходит выклинивание магматитов II фазы, в связи, с чем и степень дифференциации здесь магматического расплава весьма незначительна.

В нижних горизонтах этих интрузивов залегают долериты средне-мелкозернистые, измененные, с реликтовой офитовой, пойкилофитовой структурой. Их состав: плагиоклаз – 53 %, клинопироксен – 35 %, оливин (псевдоморфозы) – 7-10 %, рудные – 3-4 %, большинство

клинопироксенов замещены хлоритом. В верхних частях присутствуют микродолериты и афанитовые долериты, интенсивно измененные, с реликтовой гиалопилитовой структурой. Краевые части интрузивов представлены долеритами оливиновыми, мелкозернистыми, интенсивно измененными, с реликтовой пойкилофитовой, участками долеритовой структурой, в составе которых плагиоклазы присутствуют в количестве до 50 %, клинопироксены – 28 %, оливин – 20 %, рудные – до 1-2 %. Темноцветные минералы практически полностью замещены кальцитом и хлоритом, плагиоклазы – цеолитом.

К проявлениям третьей, завершающей фазы становления палеовулканоструктур, относятся магматические образования дайкового комплекса и связанные с ними маломощные пластовые тела долеритов, однако на участке работ они не представлены.

Контакты интрузий с вмещающими породами всегда резкие, ровные, иногда слабоволнистые и причудливо извилистые. Температура магматического расплава в краевых частях данных интрузий была не высокой. Об этом свидетельствует тот факт, что в зоне экзоконтакта вмещающие породы практически не претерпели значительных изменений. Лишь на контакте с песчаниками верхнепалеозойского разреза отмечаются слабая карбонатизация и изменение окраски за счет проработки их газово-жидкими флюидами и эманациями. Отмеченные в зоне эндоконтакта захваченные ксенолиты вмещающих пород, в том числе и углистые разности, сохранили практически все свои морфологические и структурно-текстурные особенности.

Непосредственно на самом эндоконтакте часто наблюдается корка (1-5 мм) вулканического стекла, иногда содержащая мелкие изометричные и неправильной формы миндалины, выполненные хлоритом, кальцитом, редко цеолитами.

Ыгыаттинский алмазоносный район

Сюльдюкарское поле Ыгыаттинского алмазоносного района в целом схоже по строению с Мало-Ботубинским. На глубинах, изученных поисковым бурением, вскрыты породы холомолохской, ботубинской, ахтарандинской, боррулойской, чичиканской, укугутской и оруктахской свит, а также четвертичные отложения. Основные характеристики большинства свит, проявленных в этом поле, указаны в описании стратиграфических подразделений для Мало-Ботубинского района, однако есть и различия, потому ниже кратко представлены все стратиграфические подразделения.

Кембрийская система. Верхний отдел представлен холомолохской свитой ($\text{Є}_{3\text{hl}}$). Отличие от Мало-Ботубинского района наблюдается лишь при анализе данных РФА и состоит в том, что Сюльдюкарский разрез в целом более карбонатный по сравнению с участком Улахан-Курунг-Юрях. В центральной части Сюльдюкарского поля (Рис. 1.7) на поверхность не выходит, выходы на дневную поверхность отмечены только в долинах рек Холмолых-Юрях и Сюльдюкар,

находящихся северо-восточнее и юго-западнее соответственно. Сложена алевролитами и алевроитистыми доломитами.

Каменноугольная система. Средний и верхний отделы представлены ботубобинской свитой (C_{2-3bt}), которая также не встречается в центральной части Сюльдюкарского поля. Выходы на дневную поверхность отмечены только в бортовых частях долины реки Сюльдюкар. Сложена песками, галечниками, алевролитами, глинами и углями.

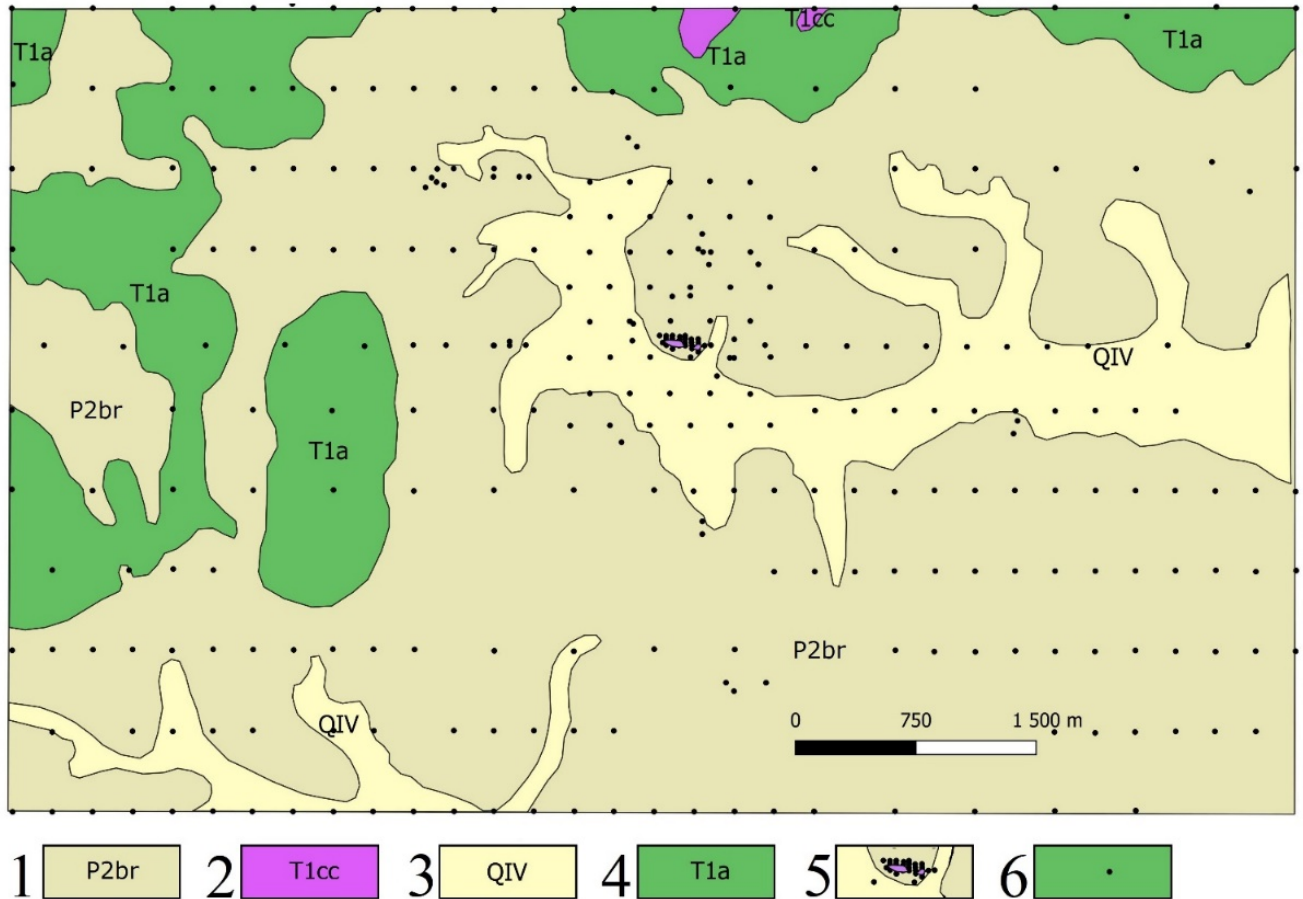


Рис. 1.7 Центральная часть Сюльдюкарского поля (Карта составлена геологами ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) – Ответственный исполнитель Мальков А.А., составил Васильев А.П., Бережнев И.И., 2017г. с дополнениями автора)

1 – боррулойская свита верхнего отдела пермской системы, представлена песчаниками, 2 – чичиканская свита нижнего отдела триасовой системы, представлена туфами, 3 – четвертичная система, представлена аллювиальными отложениями, 4 – ахтарандинский магматический комплекс, представлен габбро-долеритами, 5 – сюльдюкарское кимберлитовое тело, 6 – устья скважин

Пермская система. Нижний отдел представлен ахтарандинской свитой. Ахтарандинская свита (P_{1ah}) представлена отложениями прибрежных частей мелководного бассейна. Залегаet со стратиграфическим несогласием на ботубобинской свите и угловым – на балыктахской и холомолохской. Выходы на поверхность имеются лишь по левобережью р. Оркютей. Наиболее полные разрезы свиты вскрыты в истоках р. Кютер-Кюельях.

Песчаники серые, голубовато-серые кварц-полевошпатовые разнозернистые, в подошве глинистые с гравием и галькой. Мощность – до 13 м. Алевролиты песчанистые темно-серые горизонтально-слоистые со слойками тонких швов и углистых глин мощностью – до 17 м. Полная мощность – до 30 м. Здесь же, в северо-западной части поля, отмечена наибольшая мористость осадков, встречаются остатки двухстворчатых моллюсков, криноидей. Углистость пород незначительная. Песчаники кварц-полевошпатовые с глинисто-известковистым базальным цементом. От ботубобинских отличаются лучшей сортировкой и чётче выраженной слоистостью.

Алевролиты песчанистые тёмно-серые углистые горизонтально-слоистые с прослоями песков полимиктовых и глин, уплотнённых с *Bunquria*. Алевролиты глинистые черные слабо углистые вязкие неясно слоистые.

Свита характеризуется относительной выдержанностью вещественного состава. Некоторая изменчивость его отражает фациальную обстановку седиментации. Местами отмечается повышенная углистость, лучшая сохранность отпечатков растительных остатков, следов жизнедеятельности илоедов и т. п. Галька и гравий присутствуют в различных количествах, от единичных долей до 40 % объёма песчано-галечного слоя. Галька мелкая, хорошо окатанная.

Алевролиты представлены широким спектром размерности от песчанистых до глинистых, с соответствующей сменой окраски от светло- до тёмно-серой. Текстура слоистая, реже массивная и комковатая, сортировка средняя.

В породах ахтарандинской свиты встречаются находки МСК. Среди них преобладает ильменит (44-72 %), примерно в равных количествах постоянно отмечаются альмандин, эпидот, турмалин, сфен. Пироп и пикроильменит отмечаются значительно чаще, чем в ботубобинской свите. Имеются также и единичные находки алмаза.

Физические свойства пород свиты также мало отличаются от ботубобинских отложений и существенно от нижнепалеозойских. Плотность колеблется от 2,5 до 2,9 г/см³.

Свита содержит богатый комплекс отпечатков растений, принадлежащих, по определению И.М. Мащук, к видам: *Rufloria derzavinii* (Neub) S.Meyen, *Samaropsis ampulliformis*, *S. pseudotrigueta* Neub., *Cordaites sunguleris*, *C. pseudoaequalis*, *Evenkiella schortonotesis* Gorel., *Annularia planifolia* Radcz и др. Все они характеризуют бургу克林ский биостратиграфический горизонт нижней перми Тунгусской синеклизы и промежуточный горизонт нижней перми Кузбасса. К этому же возрасту О.А. Бетехтина относит раковины рода *Bunguria*. [1].

Верхний отдел представлен боррулойской свитой (P_{2br}). Занимает большую часть всей центральной площади Сюльдюкарского поля. Сложена песчаниками, алевролитами и линзами галечников.

Триасовая система. Нижний отдел представлен чичиканской свитой ($T_{1c\check{c}}$), развитой фрагментарно в центральной части Сюльдюкарского поля. Представлена в основном, туфами, туффитами, туфопесчаниками базальтоидного состава.

Юрская система. Нижний отдел представлен укугутской и оруктахской свитой. Выходы укугутской свиты представлены только в долине реки Холомолох-Юрях, на востоке Сюльдюкарского поля. Сложена песчано-гравийно-галечными отложениями, песками, алевролитами, гравелитами и конгломератами.

Оруктахская свита (J_{1or}) распространена на Сюльдюкарской площади значительно шире укугутской. Выполняет как Чагдалы-Аппычинскую, так и локальные депрессии (Верхнеукугутскую, Оркютейскую и др.). Залегает согласно (иногда с локальным несогласием) на укугутской свите, или же непосредственно на породах палеозоя, туфах и траппах. Основные поля выходов на земную поверхность расположены по правобережью бассейна р. Апыча от ее истоков до устья. Естественных обнажений нет. Сложена свита песками, алевролитами (нередко глинистыми и углистыми). В нижних частях разреза свиты отмечаются галечники и конгломераты иногда значительных мощностей, что в целом для неё не характерно. Отложения свиты принадлежат русловым, пойменным и озёрно-болотным фациям. Мощность их – 0 до 40м.

Вещественный состав основных литологических разностей свиты не имеет существенных отличий с таковыми укугутской свиты. Обломочный материал привнесен с тех же территорий что и в укугутское время. [1]

Четвертичная система. Современное звено (Q_{IV}) на Сюльдюкарской площади представлено элювиальными, делювиальными, коллювиальными, болотными, озерными, аллювиальными и смешанного генезиса отложениями, развитыми повсеместно, расчленение их произведено согласно новой легенде Верхневилуйской серии листов Госгеолкарты-200 (1998г.), с выделением среднего, верхнего и современного звеньев. При удовлетворительной изученности вещественного состава возрастная принадлежность их базируется, в основном, на данных работ 50-60-х годов. [1].

Среди магматических образований Сюльдюкарского поля выделяются распространённый регионально ахтарандинский комплекс, а также Сюльдюкарская кимберлитовая трубка, сложенная двумя сближенными телами. Химически и минералогически кимберлит имеет несколько особенностей [39]. По результатам химического анализа кимберлитов более измененные кимберлиты западного тела характеризуются пониженными содержаниями оксидов Si и Mg и более высокими содержаниями Ca, летучих компонентов, щелочей, Sr, Zn и Ni по сравнению с характерными значениями для кимберлитов. Среднее содержание K_2O в западном теле в 2 раза, а NiO в 2,5 раза превышает его количество в восточном. Установлены близкие средние содержания практически всех основных оксидов в ПК и АКБ при заметно повышенных

количествах суммарного Fe, Ba и Zn в ПК. Для кимберлитов в целом характерны средняя титанистость (содержание TiO_2 обычно более 1 мас.%), повышенная щелочность и широкие вариации содержаний CaO [39]

Средне-Мархинский алмазоносный район.

Представлен Накынским кимберлитовым полем. В работе приведено описание пород, находящихся на глубине примерно до 150 м. Это продиктовано глубиной пробуренных поисковых скважин на кимберлиты.

Кембрийская система представлена мархинской свитой верхнего отдела. Нижняя часть свиты сложена известняками, доломитами, аргиллитами, алевролитами и мергелями. В средней части разреза развиты тонко переслаивающиеся аргиллиты известковистые и известняки глинистые, с тонкими пропластами буровато-коричневых мергелей. Верхняя часть разреза кембрийских отложений представлена переслаиванием терригенных (преимущественно аргиллитов) и карбонатных (известняков) красноцветных и сероцветных пород. [55].

Ордовикская система. Представлена нижним и средним отделами в Накынском кимберлитовом поле. Нижнеордовикские отложения подразделяются на олдондинскую (O_{1ol}) и сохсолохскую (O_{1ss}) свиты. Среднеордовикские отложения, сохранившиеся в узких грабенах, представлены станской свитой (O_{2st}).

Олдондинская свита (O_{1ol}) выходит на дневную поверхность в долине р. Марха; от устья ручья Дяхтар до устья реки Накын. На подстилающей свите залегает согласно. Свита разделяется на три литологические пачки.

Нижняя пачка представлена доломитово-известковистыми породами. Она характеризуется переслаиванием оолитовых, сгустковых, водорослевых и обломочно-оолитовых известняков (мощностью 5-8 м) с подчиненными прослоями тонкослоистых доломито-известковых зеленовато-серых алевролитов.

Вторая пачка представлена существенно доломитовым составом пород с повышенной глинистостью (Рис. 1.8), многочисленными прослоями доломитовых песчаников, содержащих примесь глауконита. Она имеет мощность 158,3 м. В основании пачки доломитовые алевролиты мощностью 12-14 м имеют голубовато-серую окраску. Выше по разрезу прослеживается переслаивание доломитовых песчаников, сгустковых доломитов с примесью глауконита, оолитовых доломитов и в различной степени глинистых доломитов. Разрез характеризуется значительной изменчивостью по латерали: глинистые прослои часто выпадают из разреза, замещаясь на песчанистые и сгустковые доломиты. Породы трещиноватые, кавернозные. В отложениях пачки обнаружены граптолиты *Calloqraptus* sp.



Рис. 1.8 Пелитоморфный доломит с серией микровзбросов. Наклонная скважина ЭТ-1-22. Глубина 110 м

Третья пачка, сложенная доломитами светлой окраски и голубовато-серыми доломитово-известковыми алевролитами, в среднем имеет мощность около 240 м. Отличие от нижележащих пачек: преимущественное развитие доломитово-известковых песчаников и голубовато-серых доломитовых алевролитов, исчезновение из разреза оолитовых разностей. Встречаются редкие прослои водорослевых доломитов. Прослои песчаников с глауконитом редки и маломощны. В низах пачки часто отмечаются прослои сгустковых и сгустково комковатых известняков. В кровле пачки на всей изученной площади прослеживается слой доломитовых аргиллитов.

Сохолохская свита (O_{1ss}) в разрезах поисковых скважин практически не встречалась. имеет монотонный литологический состав, представленный доломитово-кварцевыми песчаниками, реже оолитовыми разностями слабо глинистых доломитов. На нижележащей олдондинской свите залегает согласно, граница между ними условная.

Станская свита (O_{2st}) также крайне слабо представлена в керне поисковых скважин. Сложена пестроцветными мергелями и доломитовыми алевролитами, выделяются две пачки.

Триасовая система. Представлена корами выветривания (T_{2-3}). В среднем-позднем триасе на глубоко эродированной поверхности осадочных и магматических пород нижнего-среднего палеозоя сформировался гипергенный покров, перекрытый позднее раннеюрскими терригенными отложениями.

Погребенные коры выветривания представлены элювиальной и карстовой формациями. Образования карстовой формации стратифицированы и рассматриваются ниже в составе дяхтарской толщи. Образования элювиальной формации имеют пятнисто-площадное и линейное распространение. Формированию их способствовали интенсивная раздробленность пород нижнепалеозойского цоколя и широкое проявление процессов карстообразования в поле развития карбонатных пород раннего ордовика. Коры выветривания максимально развиты под отложениями укугутской свиты. Под морскими образованиями тюнгской свиты элювий

маломощен или отсутствует вовсе, вероятно, из-за интенсивного размыва трансгрессирующим морем. По керну многочисленных скважин коры выветривания установлены как на терригенно-карбонатных породах ордовика, так и на изверженных породах основного и ультраосновного составов среднепалеозойского возраста.

Юрская система. Представлена, в основном, отложениями нижнего отдела: дяхтарской толщей и укугутской свитой. В меньшей степени присутствуют в разрезе среднеюрские осадочные породы якутской свиты. Отмечены также тюнгская и сунтарская свиты, однако значимой роли в геологическом строении Накынского поля они не имеют.

Отложения дяхтарской толщи (J_{1dh}) с размывом залегают на нижнепалеозойских осадочных и среднепалеозойских интрузивных образованиях, и также с размывом перекрываются образованиями укугутской, реже тюнгской свит. Рассматриваемая толща представлена смещенными и повторно литифицированными продуктами кор выветривания: пестроцветными алевроитово-глинистыми породами со щебнем окремнелых доломитов и известняков, брекчиями, лигнитовыми аргиллитами, железистыми конгломератами, песчаниками, обрушенными глыбами и блоками терригенно-карбонатных пород, выполняющими карстовые и эрозионно-карстовые депрессии и образующими элювиально-делювиальные, делювиальные и делювиально-пролювиальные шлейфы на поверхности нижнепалеозойского цоколя. Помимо наземных воронок и депрессий отложения толщи выполняли подземные карстовые полости позднего триаса и кольматировали многочисленные тектонические трещины. Характерные особенности и признаки дяхтарской толщи: пестроцветная окраска пород, провальное-оползневое залегание, нередко со смещением нескольких литологических разностей; широкое проявление в породах следов сплывов, гравитационного скольжения, перемещения и пластических деформаций; отсутствие четких границ слоев и пачек; наличие в средней части некоторых разрезов крупных линзовидных тел углистых и угленосных отложений озерного и озерно-болотного генезиса с переотложенными спорами и пылью позднего триаса; присутствие горизонтов щебнистых конгломератов, гравелитов, галечно-песчаных обособлений с хорошей и идеальной окатанностью и полировкой части грубообломочного материала, привнесенного, по-видимому, из более древнего осадочного коллектора; преобладание в разрезах щебнистых, алевроитово-глинистых неслоистых пород (алевролитов, мергелеподобных аргиллитов), иногда с включениями галек и гравия; постоянные и многочисленные включения щебнистых обломков интенсивно выветрелых и окремнелых доломитов и оолитовых известняков ордовика мучнисто-белой окраски; широкое развитие ожелезненных и железистых пород, включений бобовин, оолитов и пизолитов гетита и магнетита; присутствие пород с тонкой слоистостью озерного типа; постоянное наличие горизонтов провальное-карстовых брекчий и брекчий обвалов, осыпей и селевых потоков. Мощность отложений дяхтарской толщи варьирует от первых метров в

делювиальных шлейфах до 65 м в карстовых депрессиях. В данном типе образований выявлен раннеюрский спорово-пыльцевой спектр с преобладанием разнообразных спор рода *Stereisporites* (до 51 %) и обилием пыльцы, в составе которой наряду с древними хвойными большой процент (до 18,4 %) составляют зерна хвойных молодого (юрского) облика [7, 41].

Отложения укугутской свиты (J_{1uk}) (ранний плинсбах) в районе выполняют Уолбинскую палеодепрессию юго-восточной ориентировки. В наиболее прогнутой ее части мощность свиты составляет 45 м [7]. Свита с размывом перекрывает образования дяхтарской толщи, коры выветривания триаса, осадочные и интрузивные породы нижнего-среднего палеозоя. Представлена она континентальными отложениями прибрежной (приморской) равнины: алевритами, песчаниками, аргиллитами и конгломератами.

В Среднемархинском алмазоносном районе подстилающие грубообломочные горизонты свиты являются основным коллектором алмазов площадного развития [7]. В составе свиты всюду преобладают алевритовые, глинистые, часто смешанные глинисто-алевритовые (алевритово-глинистые) типы пород, с углефицированными растительными остатками. Пески и песчаники присутствуют в разрезах в виде прослоев и линз, мощностью от 0,1 до 5 м, обуславливая мелко- и крупноритмичное строение разрезов. Конгломераты, гравелиты и песчано-галечные отложения в разрезах свиты образуют от одного до трёх горизонтов мощностью 0,1-4,0 м, редко до 10 м.

Более выдержан базальный горизонт конгломератов и гравелитов, обладающих следующими особенностями и признаками: светлая, реже зеленовато-серая, синевато-зеленая окраска пород, брекчиевидная текстура, наличие включений щебня и угловато-окатанных обломков, доминирование обломков местных пород из кор выветривания на породах нижнего палеозоя, реже на кимберлитах (доля привнесенных обломков кварцево-кремнистого состава не превышает 5-10 %); алевритово-глинистый, реже песчано-алевритовый состав связующей массы, полное отсутствие галек магматических пород основного состава при изобилии долеритового ильменита, наличие включений обугленной древесины и хорошо окатанных галек и гравия, переотложенных из более древнего промежуточного коллектора; высокая насыщенность продуктами размыва коры выветривания на кимберлитах в надтрубном и околотрубном пространстве.

Четвертичная система (Q_{IV}) представлена современными отложениями элювиально-делювиального, делювиального и пролювиального генезиса. Водораздельные элювиально-делювиальные образования и склоновые фации мощностью от 0,5 до 2,7 м имеют плащеобразное распространение на терригенных отложениях юры. Они сложены довольно однообразными суглинками, реже супесями грязно-серой, коричневой и бурой окраски. Нередко содержат гравий и мелкую гальку кремней. На заболоченных поверхностях выравнивания иногда развиты озерно-болотные илистые, мощностью 1,3-3,0 м.

Магматические образования района сложены породами трапповой и кимберлитовой формаций, а также своеобразными породами, приуроченными к краевым частям тел щелочных базитов – «эксплозивными брекчиями». Трапповая формация среднепалеозойского возраста, представлена интрузивными образованиями, входящими в состав известного Вилуйско-Мархинского дайкового пояса межрегионального развития и контролируемая одноименной зоной глубинных разломов. Кимберлитовая формация (возраст трубки Нюрбинская $399,6 \pm 4,6$ млн. лет по ранним данным имеет возраст 364 ± 5 млн лет, а тр. Ботубинской 344-365 млн лет), представлена трубками взрыва и интрузивными телами дайковой и неясной морфологии и входит в состав Накынского кимберлитового поля. [41].

Ыгыаттинский и Мало-Ботубинский алмазоносные районы крайне схожи (Рис. 1.9) – основное отличие это наличие мощной ахтарандинской свиты в Сюльдюкарском поле, а также более проявленные туфы чичиканской свиты нижнего триаса, которые однако и встречаются в малом количестве на поисковой площади Бестях. Средне-Мархинский район отличается от них отсутствием триассового траппового магматизма, широкой проявленностью девонского траппового магматизма, а также наличием развитой дяхтарской свиты нижней юрской системы, представленной переотложенной корой выветривания.

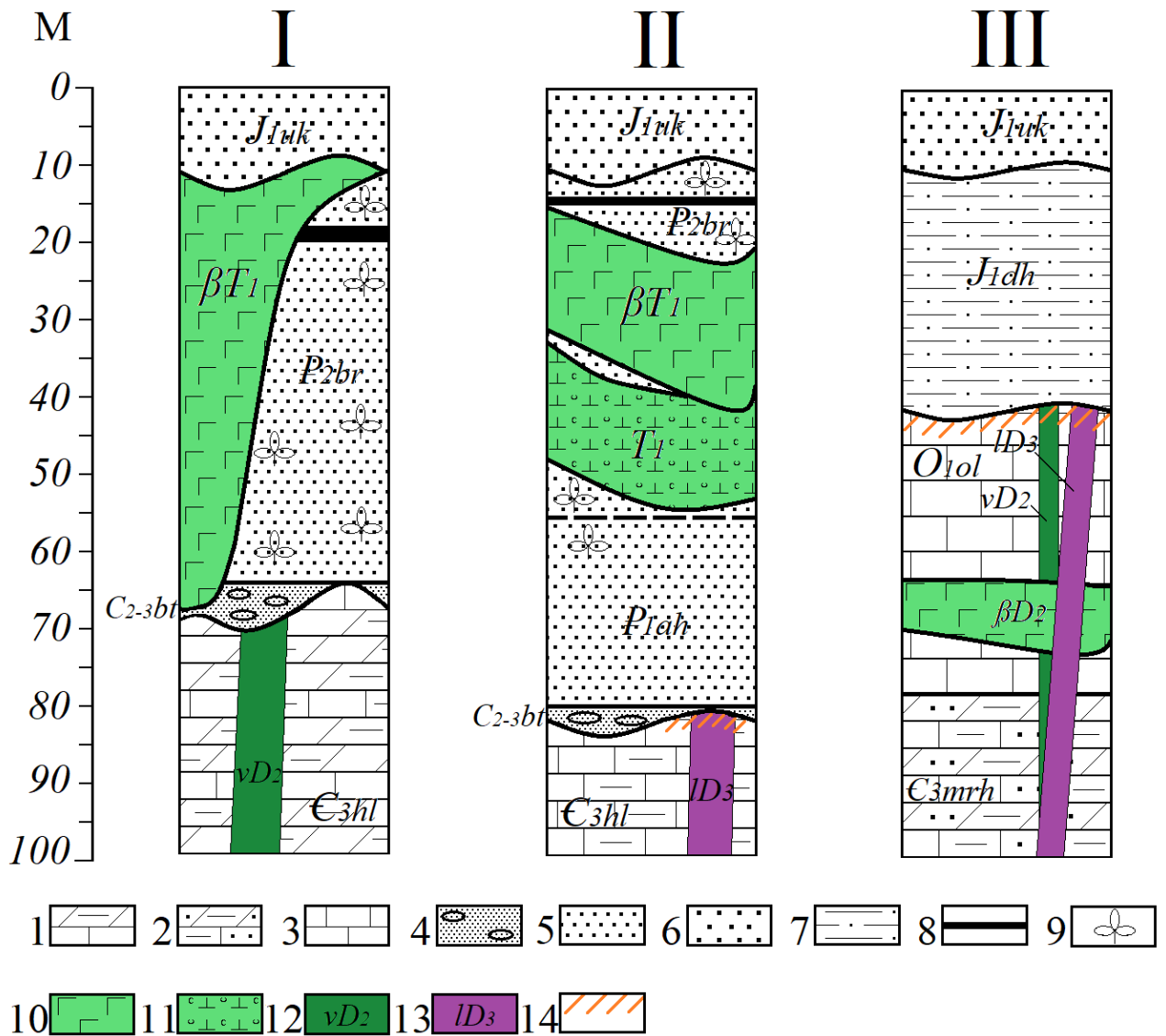


Рис. 1.9 Сводные колонки Мало-Ботубинского (I) Бзгаттинского (II) и Средне-Мархинского (III) алмазоносных районов и геологическая позиция потенциальных месторождений алмазов в кимберлитах [17]

1-4 – мелководно-морские отложения верхнего кембрия мирнинской и холмолахской свит и олондинской свиты ордовика: 1 – сероцветные песчано-глинисто-карбонатные; 2 – сероцветные и красноцветные карбонатно-глинистые; 3 – сероцветные доломиты и известняки; 4 – сероцветные полимиктовые конгломераты и песчаники ботубинской свиты карбона-перми; 5 – пермские угленосные песчаники боррулойской и ахтарандинской свит; 6-7 – мелководно-морские юрские отложения: 6 – песчаники; 7 – глины и алевролиты; 8 – слои бурых углей; 9 – углефицированный растительный детрит; 10 – силлы триасовых габбро; 11 – триасовые туфы основного состава; 12 – девонские дайки и силлы основного состава; 13 – кимберлиты, в том числе алмазоносные; 14 – древние коры выветривания

Глава 2 ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СКАНДИЯ В ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩАХ МАЛО- БОТУОБИНСКОГО, СРЕДНЕ-МАРХИНСКОГО И ЫГЫАТТИНСКОГО АЛМАЗОНОСНЫХ РАЙОНОВ ЯКУТИИ

В настоящей главе приведено обоснование первого защищаемого положения диссертации: «В Мало-Ботуобинском, Средне-Мархинском и Ыгыаттинском алмазоносных районах Якутии имеются перспективы промышленных концентраций скандия двух типов: в древних корях выветривания и впервые выявленных зонах выклинивания пластового окисления угленосных пермских пород».

В июле 2021 г. при изучении керна поисковых на алмазы скважин автором, совместно с Игнатовым П.А. и Томаровской М.А., была выделена зона пластового окисления на участке Улахан-Курунг-Юрях Мало-Ботуобинского алмазоносного поля. По аналогии с известными урановыми месторождениями песчаникового типа, было решено проверить имеющиеся данные РФА-анализов на возможные концентрации U, Re, V и Sc. Скандий оказался единственным элементом, повышенные концентрации которого не только на порядок превысили кларковые значения, но и легли в единую протяженную зону северо-восточного простирания. Позже были проверены имеющиеся данные по Сюльдюкарскому и Накынскому полям, в которых также имелись аномально высокие концентрации скандия. В работах Киселёва [28] отмечены повышенные концентрации Sc в докимберлитовых дайках базитов Вилюйско-Мархинской зоны (331 и 400 г/т), в силлах Накынского поля (369, 372 и 407 г/т), в посткимберлитовых базитах тр. Нюрбинская (366, 423, 424, 431, 437, 480 г/т), в монцонит-порфирах тр. Нюрбинская (181, 199 и 479 г/т), однако вопрос о вероятном наличии комплексных скандий-редкоземельных месторождений в известных и разрабатываемых алмазоносных полях Якутии ранее не поднимался.

Предпосылками наличия комплексных скандий-редкометалльных месторождений в алмазоносных районах Якутии являются [15]:

- широкое распространение источников скандия как базитофильного элемента в виде среднепалеозойских и мезозойских траппов, а также монцонитов, кимберлитов и карбонатитов;
- широкое распространение кор выветривания позднедевонско-раннекаменноугольного и позднетриасово-раннеюрского возраста [12];

- вероятная интенсивная миграция скандия в процессе формирования древнего грунтового и пластового окисления и его осаждение на щелочном и сорбционном барьерах в глинах, отмеченных кор выветривания;
- хорошая изученность районов бурением на доступных до 100 м связанная с проведением поисковых работ на алмазы;
- возможность отработки скандиевых руд способом скважинного подземного сернокислотного выщелачивания, опыт которого имеется при добыче урановых руд в многолетнемерзлых породах [10].

Исходя из этих предпосылок, а также имеющихся данных по концентрациям скандия основными поисковыми территориями на скандий выбраны: поисковые площади на алмазы Улахан-Курунг-Юрях и Бестях Мало-Ботуобинского района, Сюльдюкарское поле Ыгыаттинского района и Накынское поле Средне-Мархинского района, расположенные в Вилуйско-Мархинском дайковом поясе – минерагенической алмазоносной зоне (Рис. 2.1).

По всем скважинам указанных полей и поисковых площадей геологами АК АЛРОСА (ПАО) проведено штучное литогеохимическое опробование с целью не пропуска маломощных проявлений кимберлитов и скоплений минералов индикаторов кимберлитов. Опробованию подвергались все элементы стратиграфического разреза: кембрийские и ордовикские терригенно-карбонатные породы, среднепалеозойские силлы и дайки основного состава, среднепалеозойские эруптивные брекчии базитов, монцонит-порфиры и кимберлиты; образования доюрской коры выветривания, отложения дяхтарской свиты поздне триасово-раннеюрского возраста, перекрывающие терригенные мелководно-морские отложения юры. Автором создана обширная аналитическая база в виде результатов корректных рентгенофлуоресцентных определений (РФА), а также ICP-AES анализов всех обозначенных площадей. Эти данные обработаны статистически.

Признаки пластового окисления в угленосных отложениях перми выявлены на площадях Мало-Ботуобинского и Ыгыаттинского алмазоносных районов Якутии, отстоящих друг от друга на сотни километров (Рис. 2.2), что указывает на масштабное проявление древних гипергенных процессов. В указанных районах отмечены признаки пластово-трещинного окисления в корах выветривания каменноугольного возраста. Таким образом, проявления древних эпигенетических процессов широко проявлены в Западной Якутии. [16]

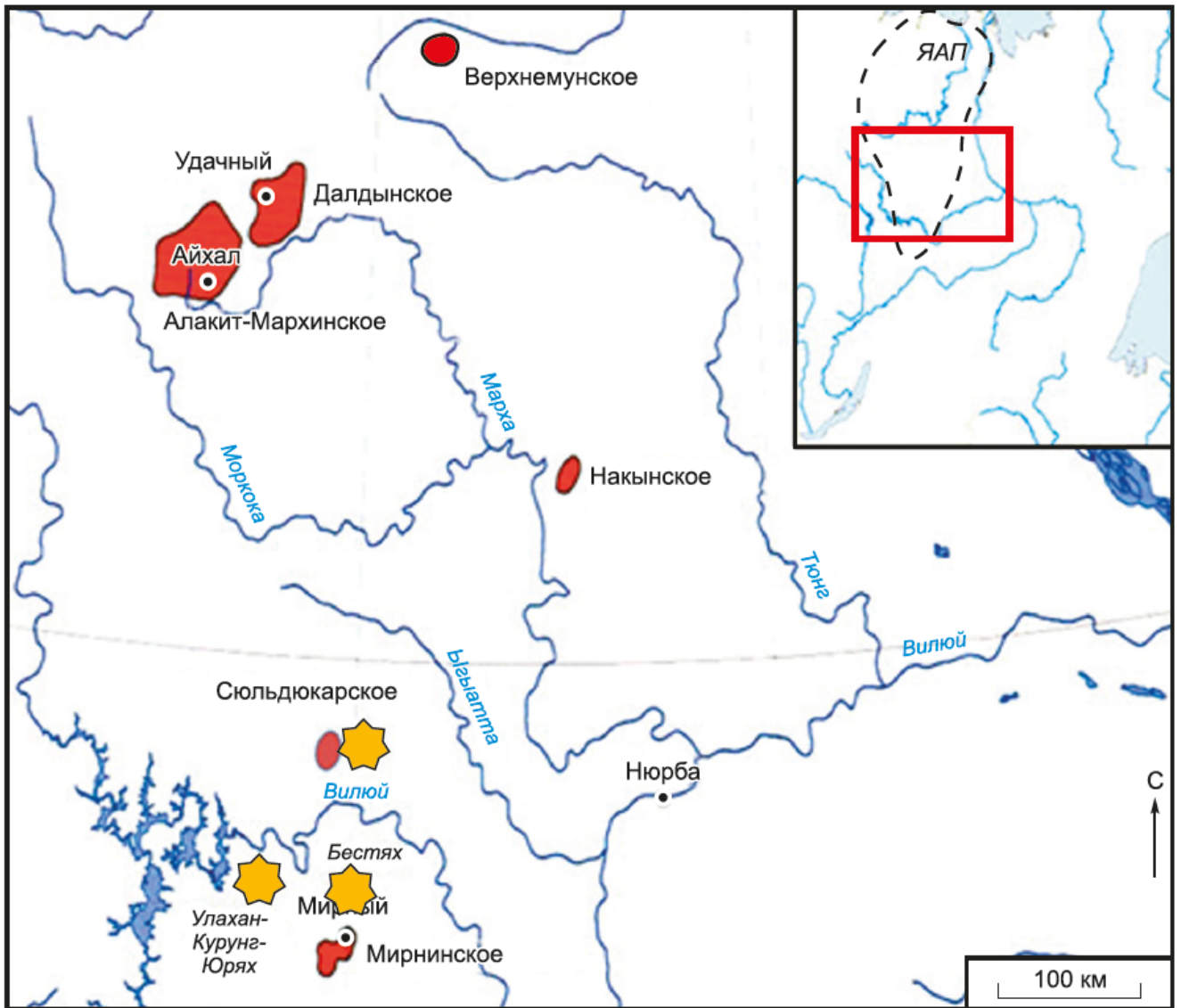


Рис. 2.2 Положение площадей, в которых детально изучены разрезы палеозоя на схеме кимберлитовых полей юга Якутской провинции [33] (Оранжевой звездочкой отмечено проявление зон пластового окисления пород карбона–перми)

Площадь Улахан-Курунг-Юрях занимает 8,2 км². Здесь задокументировано и детально изучено 244 разреза по керну плотной сети поискового бурения (от 200×200 м до 100×100 м). По результатам изучения во многих разрезах карбонатно-тонкозернистые морские отложения холомолохской свиты верхнего кембрия венчаются образованиями древней коры выветривания, перекрытые, в свою очередь, сероцветными песчаными каменноугольными отложениями ботуобинской свиты, пермскими угленосными отложениями боруллойской свиты и сероцветными алевро-песчаными отложениями нижней юры (Рис. 2.3).

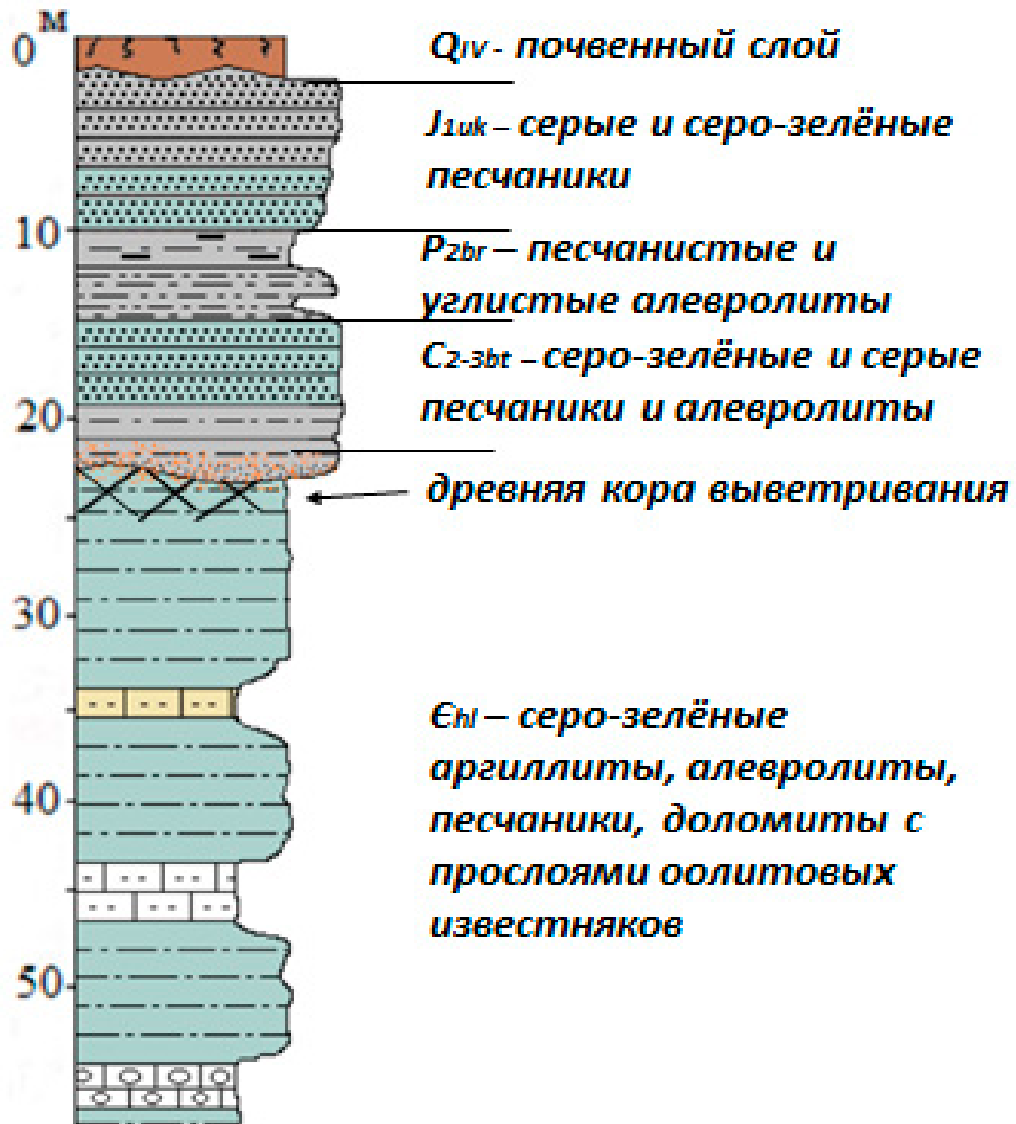


Рис. 2.3 Разрез по скважине 74,925-224,5 на площади Улахан-Курунг-Юрях

Рассматриваемая площадь является частью крупного неоген-четвертичного поднятия Маревое, которое унаследовано с позднего палеозоя, поскольку здесь резко сокращены до первых десятков метров разрезы карбона-перми и юры [31]. Севернее Маревского поднятия известна похожая Нижне-Ботуобинская положительная морфоструктура. В пределах этих структур широко распространены коры выветривания каменноугольного возраста, которые развиты как по осадочным породам кембрия и ордовика, так и по прорывающим их телам среднепалеозойских траппов [13].

Несмотря на достаточно высокую степень изученности, признаки эпигенетического окисления в толщах Мало-Ботуобинского района ранее не фиксировались. Однако авторы выявили такие признаки в первично сероцветных породах верхнего палеозоя, а также в захороненной коре выветривания каменноугольного возраста. Аналогичные образования были обнаружены и в разрезах поисковой площади Бестях. С этими образованиями связаны скопления скандия и сопутствующих металлов.

В разрезах ботуобинской и боруллойской свит признаки зон внутрипластового окисления (ЗПО) проявляются в виде лимонитизации и осветления первично сероцветных пород. Подобные изменения хорошо изучены и описаны для урановых месторождений песчаникового типа в работах таких исследователей, как Г.В. Грушевой, А.К. Лисицын, М.Ф. Максимова, Г.А. Машковцев, А.И. Перельман, И.Г. Печенкин, С.Д. Расулова, В.Н. Щеточкин, Е.М. Шмариович, Д. Блайл, В. Финч, Г. Шоу и др. Эти признаки активно применяются в практике поисково-оценочных и разведочных работ на уран, а также на редкие и рассеянные элементы.

На площади Улахан-Курунг-Юрях проявления пластово-инфильтрационных окислительных процессов в породах карбона-перми выражены по-разному, что, вероятно, отражает различную степень окисления. При полном окислении органического вещества и темноцветных минералов Fe^{+2} наблюдаются ярко-желтые лимонитизированные песчаники, которые контактируют с первично сероцветными породами (Рис. 2.4).



Рис. 2.4 Контакт неокисленных серых алевролитов (слева внизу) и лимонитизированные песчаников ботуобинской свиты. Скважина 75,125-215,5, интервал 17-21 м.

В случае неполного окисления органического вещества породы имеют белесый и светло-салатовый цвет и контактируют с лимонитизированными породами. (Рис. 2.5).

В других случаях наблюдается чередование лимонитизированных и осветленных интервалов, что свидетельствует о сложном и неполном окислении. Также встречается мелкопятнистая лимонитизация или небольшие, до нескольких метров, интервалы осветления,

которые указывают на начальные стадии окислительных процессов. В некоторых разрезах пластовое окисление проявляется исключительно в виде осветленных песчаников и алевролитов.

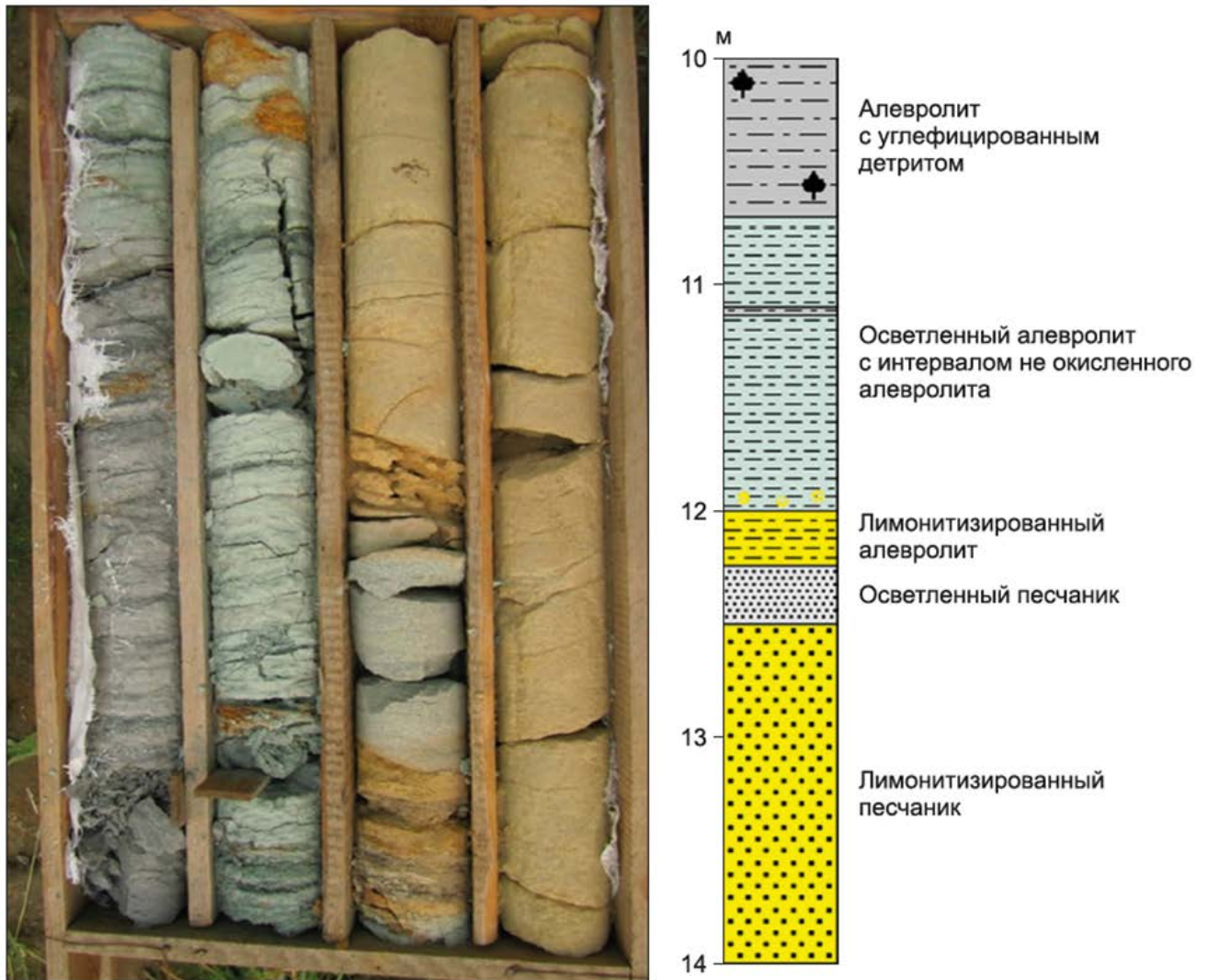


Рис. 2.5 Зоны пластового окисления в породах ботубинской свиты, снизу-вверх, (слева-направо): неизменные серые алевролиты, осветленные салатово-светло-зелёные, лимонитизированные мелкозернистые песчаники с прослоем осветленных песчаников, алевролиты боруллойской свиты. Скважина 74,61-217,5, интервал 10-14 м

Аналогичные проявления окислительных процессов отмечаются и в разрезах карбона-перми в пределах поисковой площади Бестях. Здесь был изучен керн 131 скважины на площади 6000 км². В большинстве случаев вскрыты лимонитизированные и осветленные разновидности песчаников. Широкое площадное распространение этих процессов указывает на значительные масштабы массообмена.

На площади Улахан-Курунг-Юрях внутри лимонитизированных и осветленных пород обнаружены маломощные, толщиной в первые сантиметры, линзы черного цвета, содержащие сульфиды железа. Эти линзы интерпретируются как локальные участки вторичного восстановления, связанные с деятельностью сульфат-редуцирующих бактерий.

Доказательством развития внутрипластового окисления в рассматриваемой толще служит фрагмент латеральной зональности, где наблюдается смена лимонитизации и полного окисления соединений железа и органического вещества на осветленные породы. В последних соединения двухвалентного железа остаются неокисленными, а углистый материал подвергается окислению (Рис. 2.6).

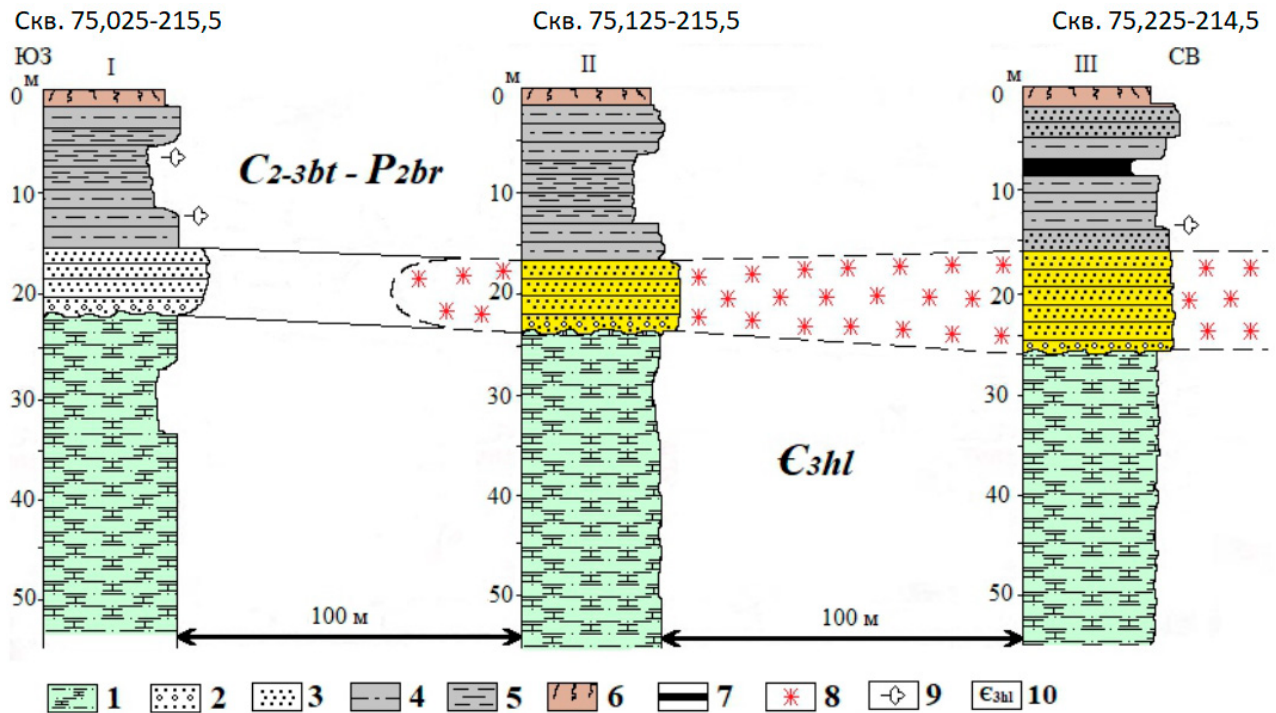


Рис. 2.6 Латеральная зональность пластового окисления в сероцветных карбон-пермских отложениях на северо-востоке площади Улахан-Курунг-Юрях

1 – известковистые алевролиты холмолахской свиты кембрия; 2 – среднезернистые песчаники с галькой в базальном слое; 3 – осветленные и сероцветные песчаники; 4 – алевролиты; 5 – аргиллиты; 6 – почвенный слой; 7 – бурый уголь; 8 – лимонитизированные песчаники; 9 – растительный детрит; 10 – возраст отложений

В пределах изученной площади Улахан-Курунг-Юрях в кровле холмолахской свиты под перекрывающими терригенными каменноугольными отложениями очень часто встречается древняя площадная кора выветривания. Она представлена известковистыми монтмориллонит-гидрослюдистыми глинами с интервалами сидерита. Ее строение и минеральный состав подробно описаны в работах Н.Н. Зинчука [13]. В этих образованиях отмечается окисление, которое следует считать трещинно-пластовым. Оно выражено интервалами интенсивной лимонитизации, гематитизации, а также осветленными светло-салатного цвета алевролитистыми глинами (Рис. 2.7).

Трещинно-пластовое окисление имеет широкое распространение и отсутствует только в разрезах, где кора выветривания отсутствует. Характерной особенностью является то, что внутри осветленных и лимонитизированных зон практически повсеместно в нижней части встречаются интервалы мощностью 10–40 см, сложенные тяжелыми породами вишнево-красного цвета,

состоящими из сидерита и гетита. Часто сидерит сопровождается зернами пирита. Эти минералы залегают под преимущественно глинистой и более рыхлой монтмориллонит-гидрослюдистой частью каменноугольной (поздний девон – ранний карбон) коры выветривания, что было отмечено в Мало-Ботуобинском районе [13].



Рис. 2.7 Пример трещинно-пластового окисления по древней плачевидной коре выветривания, охватившей известковистые глинистые породы кембрия. Осветленные алевролиты ботуобинской свиты с пятнистой лимонитизацией и осветленные также с пятнами лимонита рыхлые известковистые глины и гетит-гематит-сидеритовый агрегат мощностью 30 см в коре выветривания. Скважина 74,925-234,5 интервал 16-20 м

Можно предположить, что осветление верхней части коры выветривания, а также пятна лимонитизации с гематитом являются результатом наложения более поздних окислительных процессов. В некоторых случаях наблюдаются непрерывные переходы внутрипластового окисления в породах ботуобинской свиты, распространяющегося на горизонты подстилающей коры выветривания, как показано на примере выше (см. Рис. 1.8).

В отдельных разрезах верхней части холмологской свиты кембрия зафиксировано окисление по крутопадающим трещинам, которое может распространяться на глубину до 25 м от контакта с перекрывающими отложениями. Эти данные позволяют предположить, что при формировании зон окисления существовал единый водоносный комплекс, включавший пласты песчаников карбона-перми, трещинно-пластовый коллектор коры выветривания и линейные трещинные зоны в крутопадающих разломах в породах кембрия.

Важно отметить наличие гипса, ангидрита и ярозита в окисленных породах. Гипс встречается в виде друз игольчатых бесцветных кристаллов в трещинах пород кембрия (Рис. 2.8),

а также в виде мелкозернистых агрегатов в цементе лимонитизированных песчаников ботубинской свиты карбона.

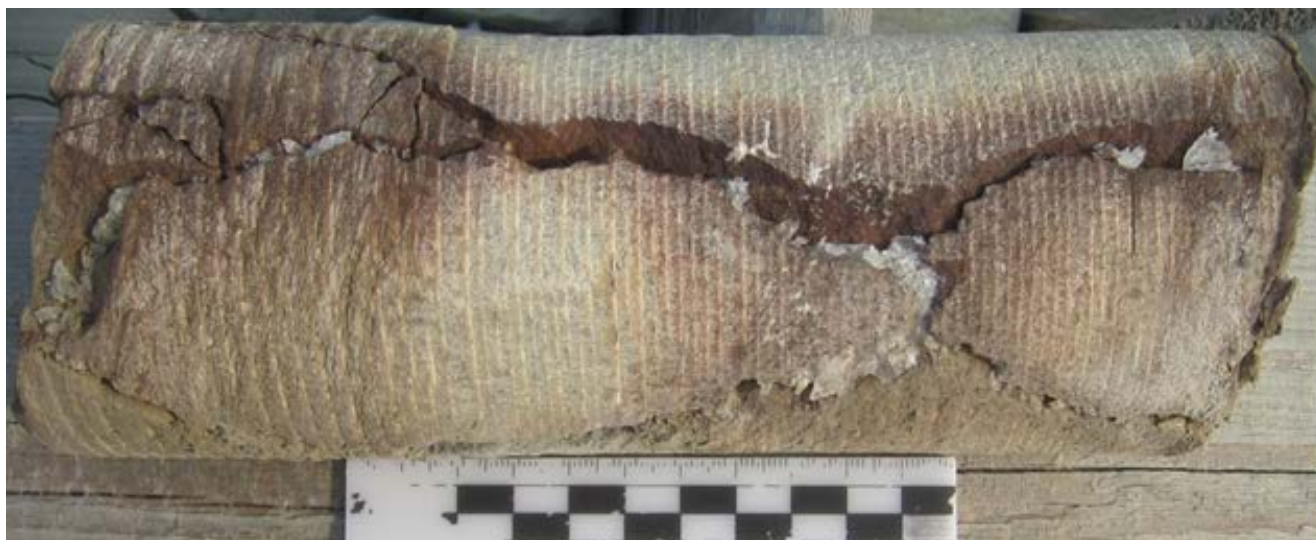


Рис. 2.8 В кривой трещине в гематитизированных по трещине алевритистых доломитах холмологской свиты друзы прозрачных бесцветных кристаллов гипса. Скважина 74,1-221,05 глубина 42 м

Вместе с ангидритом и примесью анальцима он образует белые маломощные прожилки толщиной в первые сантиметры, которые встречаются в лимонитизированных породах верхнего палеозоя (Таблица 2.1)

Таблица 2.1 – Результаты рентгенографического и термографического анализа проб скважины 75.025-212.5 участка Локальный Мало-Ботубинского района

Описание (первичное)	Глубина, м	Условные содержания, %													
		Кварц	Пирит	Полевые шпаты (Ортоклаз)	Сидерит	Марказит	Гипс	Цеолиты (Анальцим)	Ярозит	Каолинит	Ангидрит	Амфиболы (Тремолит)	Апатит	Халькопирит	Кальцит
Белый агрегат	14	29	-	-	29	-	14	13	-	7	-	8	-	-	-
Порода с выделением битума	15	47	-	30	-	-	-	-	11	-	7	-	3	1	1
Сульфид	15,5	30	47	-	-	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание к таблице: Условия съемки: дифрактометр ДРОН-8Н, излучение $V=40$ кВ, $J=40$ мА. Термоанализатор DTG-60АН, температура максимума 1000 °С. Выполнил спектроскопист 1 кат. - Черепашин Ю.Б. в лаборатории ЦАЛ ВГРЭ АК АПРОСА (ПАО)

Присутствие сульфатов явно указывает на окислительный сернокислый состав подземных вод, которые формировали пластовое и трещинное окисление. Эти воды сохранились в ручье

Улахан-Курунг-Юрях. По данным гидрогеологов Вилуйской ГРЭ, они имеют гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый-натриевый состав. Наличие окислительных сульфатных вод в верхней части рассматриваемых разрезов объясняет широкое распространение техногенных поверхностных гематитовых корок толщиной до нескольких сантиметров, развитых на керне сидерита из древней коры выветривания.

Картирование выделений гипса показало, что они приурочены к выходам на поверхность блоков кембрийских пород (Рис. 2.9). Этот факт свидетельствует о том, что подземные воды, содержащие кислород и сульфат-ионы, встречали на своем пути кальциевую карбонатную среду, в которой отлагался гипс.

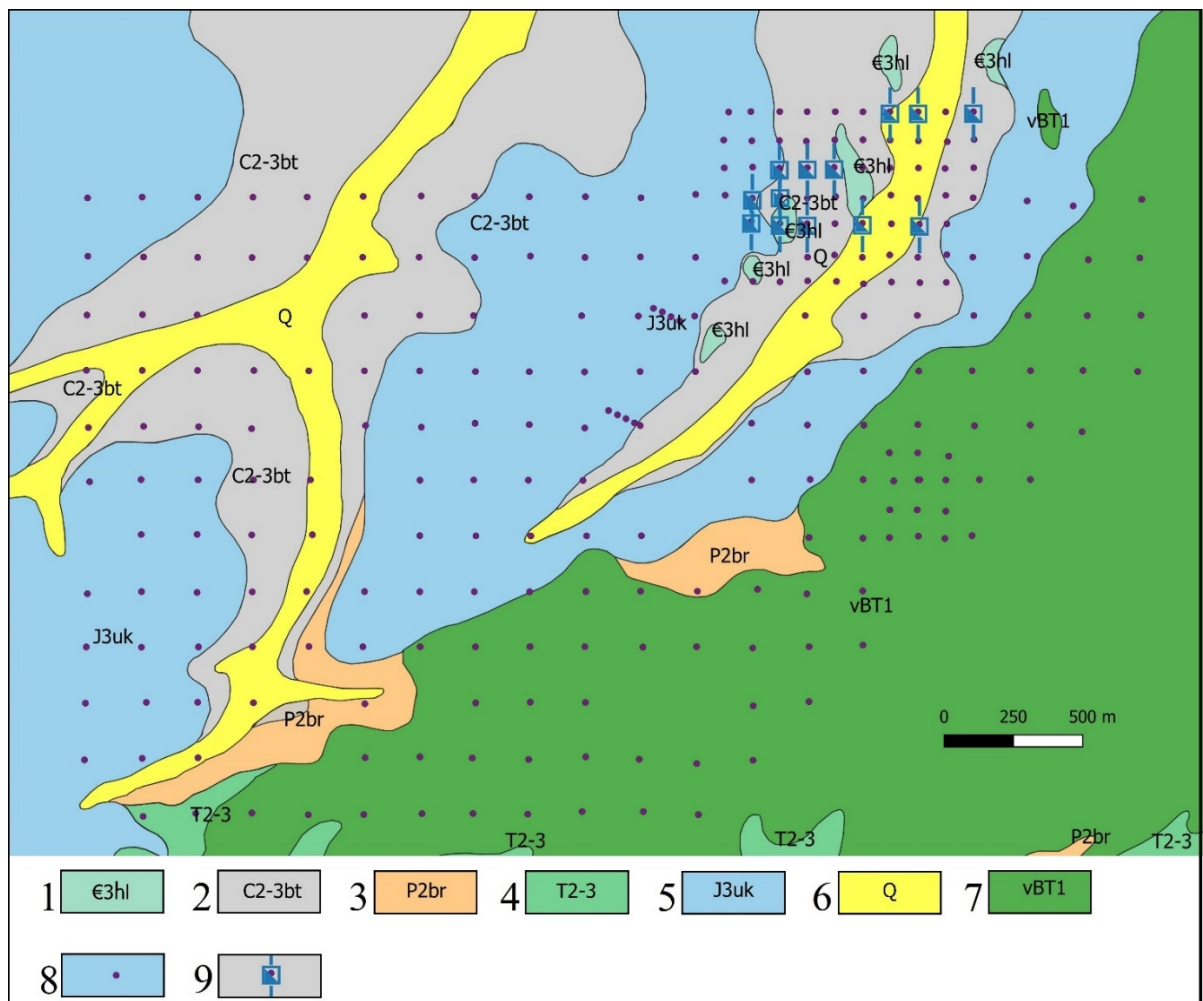


Рис. 2.9 Гипсовая минерализация на геологической карте участка Улахан-Курунг-Юрях и Локальный (Карта составлена геологами ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) – Ответственный исполнитель Васильев А.П., составил Трофимов А.Ф, Павлов В.Ю., 2019г. с дополнениями автора)

1 – 7 выходы на поверхность: 1 – холмолахская свита верхний отдел кембрийской системы, 2 – ботубобинская свита, средний-верхний отдел каменноугольной системы, 3 – боррулойская свита, верхний отдел пермской системы, 4 – триасовая система, средний-верхний отдел, глинисто-щебенитый образования коры выветривания, 5 – укугутская свита, нижний отдел юрской системы, 6 – четвертичные отложения; 7 – долериты и микродолериты ахтарандинского комплекса; 8 – скважина; 9 – прожилковые выделения гипса

На возраст зон пластового и трещинно-пластового окисления косвенно указывают следующие факты. Во-первых, горизонты с признаками ЗПО перекрыты юрскими отложениями, в которых отсутствуют признаки окисления. Во-вторых, в одном из разрезов в базальном слое юрских отложений обнаружены гальки лимонитизированных песчаников. В-третьих, встречаются разрезы, в которых нарушено субгоризонтальное залегание лимонитизированных песчаников позднего палеозоя с углами наклона до 30°. Эти данные, с учетом аридных условий триасового этапа базальтоидной тектоно-магматической активизации всего региона Восточной Сибири, позволяют предположить триасовый возраст пластового окисления.

Предполагается, что с зонами внутрипластового, пластово-трещинного и трещинного окисления могли быть связаны процессы эпигенетического рудообразования [36, 37]. В частности, возможны рудные концентрации базитофильных элементов, таких как Sc, V и, возможно, Re. Подобные типы месторождений имеют промышленное значение [5, 29, 42, 58, 65, 66, 67]. Многочисленные данные РФА заверены анализами ICP AES по 30 штучным пробам, отобранным для анализа древней зоны окисления в угленосных отложениях и древней коре выветривания (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Содержания Sc и V в г/т на площади Улахан-Курунг-Юрях

Линия бурения	Номер скважины	Глубина, м	Порода	Sc, г/т	V, г/т
Породы карбона-перми					
74,5	220,6	28	Крупнозернистый сероцветный песчаник	10,19	83,64
74,61	213,5	12	Углистый алевролит	20,12	122,60
74,61	217,5	10	Углистый алевролит	18,95	131,30
74,61	217,5	11,5	Осветлённый серый углистый алевролит	21,67	151,60
74,61	217,5	13	Лимонитизированный песчаник	11,10	83,93
74,61	217,5	5,5	Лимонитизированный песчаник на контакте с углистым алевролитом	22,48	151,20
74,61	217,5	5,5	Серый углистый алевролит на контакте с лимонитизированным песчаником	6,95	47,16
75,025	213,5	8	Серый алевролит	19,53	141,40
75,025	213,5	8,5	Серый алевролит	20,60	166,50
75,025	213,5	8,7	Осветлённый алевролит	20,13	133,60
75,025	213,5	9	Лимонитизированный алевролит	19,58	129,70
Породы коры выветривания по холомолохской свите					
71,5	240,5	50	Карбонатно-глинистая порода	6,92	56,03
71,5	240,5	46,5	Сидеритизированная порода	<побн*	35,06
72,5	240,5	49	Карбонатно-глинистая порода	8,09	48,79
72,5	240,5	49,7	Осветлённая глинистая порода	14,43	133,10
72,5	240,5	50,8	Лимонитизированная порода	2,76	49,84
72,5	240,5	51	Сидеритизированная порода	0,18	32,26

Продолжение Таблицы 2.2

Линия бурения	Номер скважины	Глубина, м	Порода	Sc, г/т	V, г/т
72,9	270,5	43	Сидеритизированная порода	0,70	50,58
73,3	212,5	110	Рыхлая глинистая породы	7,46	62,98
73,3	212,5	113	Карбонатно-глинистая порода	9,31	67,23
73,3	212,5	111	Сидеритизированный доломит с реликтами пирита	3,37	49,59
73,5	240,5	54	Рыхлая глинистая породы	16,14	136,40
73,5	240,5	57,5	Карбонатно-глинистая порода	6,80	38,51
73,7	222,5	31,5	Сидеритизированная порода с пиритом	3,04	46,16
74,61	217,5	35	Сидеритизированная порода	<побн*	20,50
74,925	204,5	56	Лимонитизированная порода	5,74	33,64
75,125	213,5	5,5	Осветлённая глинистая порода	13,45	107,80
75,125	213,5	6,5	Лимонитизированная порода	16,38	125,00
75,125	213,5	7	Сидеритизированная порода	1,97	38,29
75,225	216,5	30	Прослой чёрной породы с пиритом	4,68	60,29

*<побн – значение меньше предела определения

Примечание: анализы ICP AES выполнены в ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) из отобранных авторами проб

Согласно данным ICP AES, в эпигенетически измененных породах карбона-перми установлены повышенные концентрации обоих элементов по сравнению с окисленными породами коры выветривания, развитыми по породам кембрия. Повышенные содержания в угленосных терригенных отложениях приурочены к зонам контакта окисленных (лимонитизированных или осветленных) и неизмененных первично сероцветных пород, где формируется геохимический барьер. В коре выветривания повышенные содержания элементов связаны с рыхлыми осветленными белесо-салатными карбонатными алевролитистыми глинами, которые, вероятно, создавали щелочной и сорбционный геохимические барьеры.

Из более чем 1500 РФА анализов, выполненных на площади Улахан-Курунг-Юрях, в 43 пробах содержание скандия (Sc) варьируется от 30 до 82 г/т (до 7 кларков-конcentраций для глинистых пород). Подавляющее большинство этих значений выявлено в глинистых породах коры выветривания или в терригенных отложениях верхнего палеозоя. Следует отметить, что опробование изначально было нацелено на поиск геохимических признаков кимберлитов или их минеральных индикаторов, а не на определение Sc, который вообще не входил в перечень анализируемых элементов. Большая часть проб с повышенными содержаниями Sc локализована под sillами триасовых траппов (Рис. 2.10), которые могли выполнять роль регионального водоупора в древнем инфильтрационном артезианском бассейне.

Можно предположить, что выявленные концентрационные ореолы скандия (Sc) фиксируют сложную зону выклинивания внутрипластового окисления в породах верхнего палеозоя, а также площадные сорбционный и щелочной барьеры, способствующие его осаждению в карбонатно-глинистом материале древней коры выветривания.

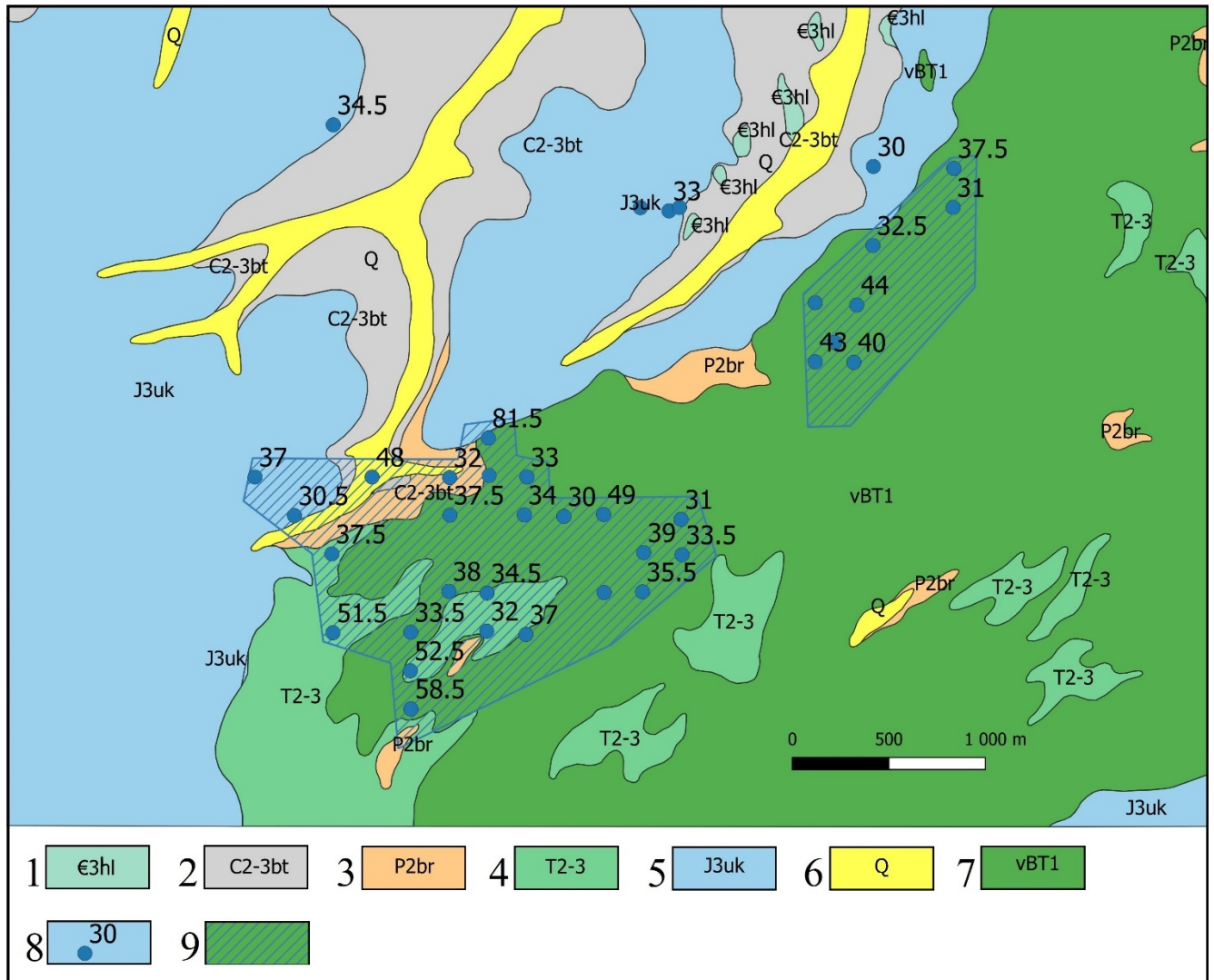


Рис. 2.10 Распространение концентраций Sc выше 30 г/т в породах карбона-перми и кембрия.

1 – 7 выходы на поверхность: 1 – холмологская свита верхний отдел кембрийской системы, 2 – ботубинская свита, средний-верхний отдел каменноугольной системы, 3 – боррулойская свита, верхний отдел пермской системы, 4 – триасовая система, средний-верхний отдел, глинисто-щебенистый образования коры выветривания, 5 – укугутская свита, нижний отдел юрской системы, 6 – четвертичные отложения; 7 – долериты и микродолериты ахтарандинского комплекса; 8 – скважины, в которых наблюдаются содержания Sc выше 30 г/т; 9 – зоны локализации содержаний Sc выше 30 г/т

Подобные сложные и вытянутые зоны характерны и для поисковой площади Бестях в этом же районе. Кроме того, на этой площади в породах нижнего палеозоя обнаружены признаки восстановительного эпигенеза. Они проявляются в виде битумов и прожилкового осветления пород холмологской свиты кембрия (Рис. 2.11). Битумы найдены в сероцветных породах

карбонатного состава. Обычно они матовые, черно-серого цвета, но также встречаются блестящие разновидности, напоминающие оксикерит.



Рис. 2.11 Прожилковое выделение битума в глинисто-карбонатной породе холмологской свиты. Скважина 61,6-117,6, глубина 103 м.

Проявления битумов сопровождаются сорбированными углеводородными газами, которые выделяются при раскалывании породы с характерным резким запахом свежего асфальта. Признаки углеводородов в разрезах кембрия также выражены в виде прожилков осветления, пересекающих первично красноцветные карбонатно-глинистые породы верхнего кембрия. Такое осветление широко распространено в алмазоносных районах Якутии и Архангельской области, где оно маркирует разломы и отражает привнос углеводородных газов в породы нижнего палеозоя с одновременным выносом железа (осветление пород) [18].

На поисковой площади Бестях проведено детальное картирование вторичных битумов, распространенных в кембрийских отложениях. Выявлены узкие (до нескольких сотен метров) и протяженные (до 2,5 км) меридиональные ореолы (Рис. 2.12). Они сопровождаются точечными проявлениями битумов, объединенными в линзовидные ореолы. Линейная битуминизация локализована вдоль разломов, входящих в региональный Вилуйско-Мархинский среднепалеозойский дайковый пояс.

В битумах могут содержаться высокие концентрации ванадия и редких элементов, что характерно для вязких нефтей [53]. В одной из двух проб глинистых доломитов кембрия, где содержание битумов достигает около 20%, по данным ICP-AES, выполненным в лаборатории ВИМСа, установлены следующие содержания элементов: ванадий — 178 г/т (9 кларков концентрации для карбонатных пород), уран — 7,2 г/т (3 кларка концентрации для карбонатных пород), скандий — 14 г/т (14 кларков концентрации для карбонатных пород).

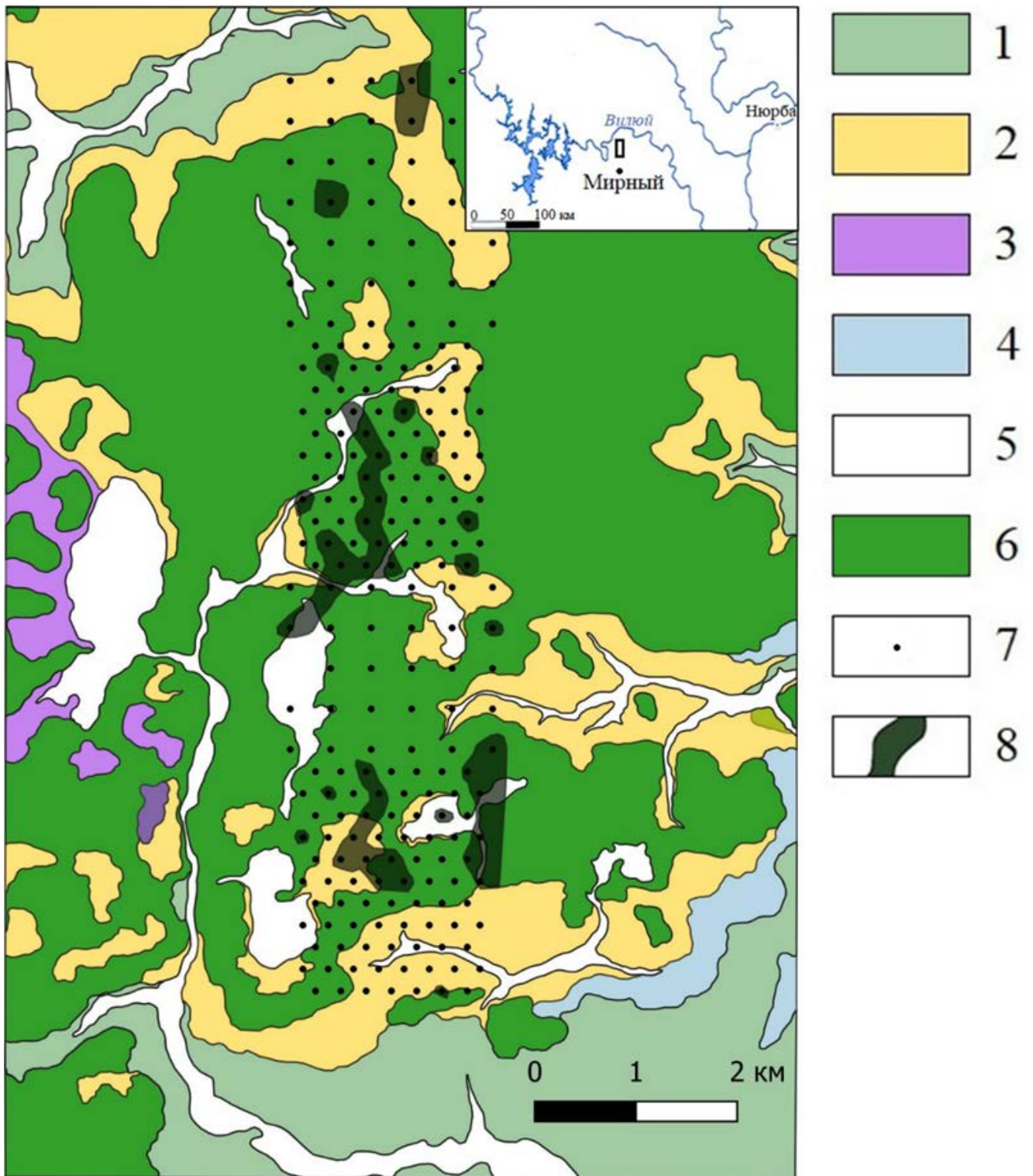


Рис. 2.12 Геологическая схема и ореолы прожилково-вкрапленных битумов в породах кембрия на площади Бестях Мало-Ботуобинского района (составлено по материалам геологов ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО))

1 – терригенно-карбонатные породы холмолахской свиты верхнего кембрия, 2 – песчаники боруллойской свиты средней перми, 3 – туфы чичиканской свиты нижнего триаса, 4 – песчаники оруктахской свиты нижней юры, 5 – аллювиальные четвертичные отложения, 6 – триасовые габбро-долериты, 7 – устья скважин, 8 – ореолы прожилково-вкрапленных битумов в породах холмолахской свиты

Проявления углеводородов создают объемную восстановительную среду, которая благоприятна для осаждения редких элементов в ходе окислительно-восстановительных процессов.

В терригенных угленосных породах перми на рассматриваемой площади обнаружены проявления эпигенетического пластового окисления, которые закономерно сопровождаются осветлением сероцветных песчаников (Рис. 2.13 а). Это осветление, вероятно, связано с окислением углистого органического вещества, распространенного в песчаных породах перми в виде тонкого детрита. Встречаются разрезы, где окисленные лимонитизированные песчаники непосредственно контактируют с бурыми углями (Рис. 2.13б, в). В таких зонах предполагается возможность концентрации редких элементов в углях на контрастном восстановительном и сорбционном барьерах.

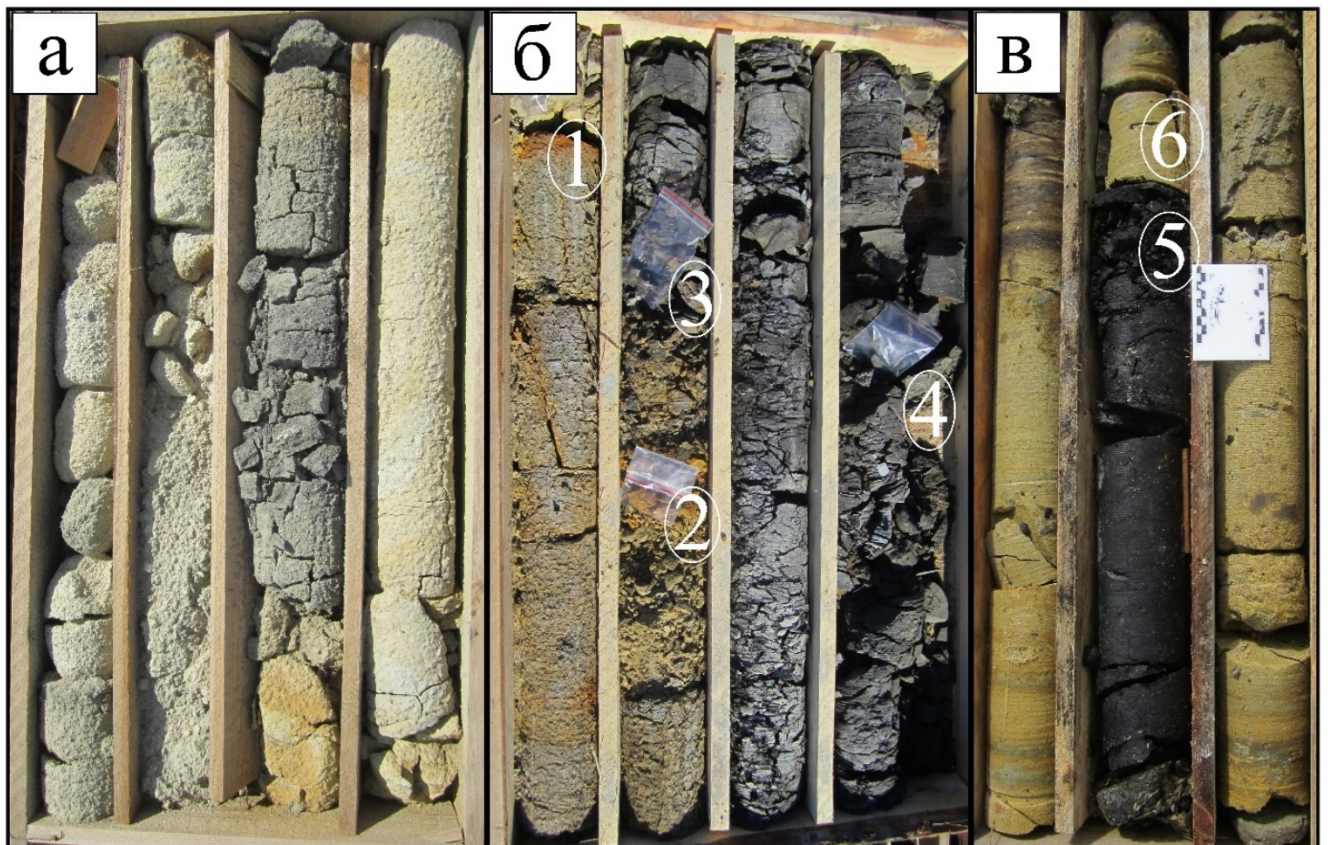


Рис. 2.13 Фрагменты разрезов пермских отложений по керну со 100% выхода с ярко выраженной контрастностью внутрипластового окисления: а) фрагмент серого углистого песчаника в окисленных, лимонитизированных и осветленных песчаниках; скважина № 60.8-117.2, интервал 52-56 м; б) контакт мелкозернистых лимонитизированных песчаников и углистого алевролита с прослоями бурого угля, скважина № 59.532-116.475, интервал 21-24 м; в) контакт лимонитизированного песчаника и угля, скважина № 58.666-117.225, интервал 21-22 м. 1-6 пробы, отобранные для ICP-AES анализа (см. таб. 3).

Данные ICP-AES двух проб на контакте угля и лимонитизированного песчаника подтверждают это (Таблица 2.3). В угле обнаружены высокие концентрации (г/т) скандия (20),

ванадия (276), иттрия (147), редких земель, особенно неодима (121) и церия (214), которые можно связать с сорбцией органическим веществом. Также повышены концентрации никеля и кобальта, которые очевидно накапливались на сульфидном барьере. Если же обстановка не столь контрастная и контакт окисленных песчаников и углей не ярко выражен, то существенного накопления элементов не происходит.

Таблица 2.3 - Результаты ICP анализов (г/т) керновых проб, отобранных из фрагментов разрезов скважин, показанных на рис. 2.13

№ скважин	№ проб (глубина отбора, м)	Породы	La	Nd	Y	Ce	Mo	Sc	V	Co	Ni
59.532-116.475	1 (21.5)	Песчаник сероцветный	40	39	23	70	11	13	71	6	25
	2 (22)	Лимонитизированный песчаник	39	36	24	69	4	8	55	19	38
	3 (22.3)	Углистый алевролит на контакте с окисленным песчаником	42	38	23	72	1	14	75	9	30
	4 (24)	Углистый алевролит	51	45	34	87	1	14	73	17	67
58.666-117.225	5 (21.8)	Уголь	98	121	147	214	4	20	276	31	198
	6 (21.9)	Лимонитизированный песчаник	15	17	10	26	1	5	71	2	19
Кларк для песчаников [68]			15	18	18	35	1	7	30	9	35
Кларк для углей [26]			11	12	8	23	2	4	25	5	13

Примечание: анализы ICP AES выполнены в ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) из отобранных авторами проб

В сероцветных песчаниках перми надо отметить не значительные концентрации ряда элементов относительно кларка: ванадия (в 2 раза), скандия (в 2 раза), лантана (в 2.5 раза) и церия (в 2 раза) и более значительные концентрации молибдена (в 10 раз). В то же время, в углистых породах, концентрации никеля и ванадия больше кларка для углей в 10 раз, кобальта и скандия приблизительно в 5 раз, а редкоземельных элементов (Ce, La, Y, Nd) – на порядок.

Содержания урана как в первичных, так и в изменённых кембрийских и пермских породах по данным ICP-AES не определялись. По малочисленным данным рентгено-флюоресцентного анализа, и гамма-каротажу выполненных в лаборатории Вилуйской ГРЭ они субкларковые. Это следует связать с отсутствием в областях питания подземных вод геохимически специализированных на уран комплексов: нет углеродистых сланцев, нет гранитоидов.

Известно, что уран-редкометалльные месторождения песчаникового типа локализованы в зонах выклинивания пластового окисления, ширина которых составляет десятки-первые сотни метров. Имеющаяся сеть наблюдений (250x200 и 400x400) явно недостаточна для вскрытия таких тел. Полученные единичные анализы следует рассматривать как ориентировочные.

Установленные концентрации редких элементов указывают на существование первичных геохимических ореолов вероятных рудоносных зон.

Результаты детального картирования лимонитизированных и осветленных пород пермской толщи, вмещающей триасовые силлы долеритов, показали наличие полосы, выклинивания зоны внутрипластового окисления, представленной осветленными песчаниками. Она прослежена на расстоянии более 10 км. (Рис. 2.14).

На рисунке 2.14 видно, что граница максимальных мощностей полностью окисленных песчаников конформна линии выклинивания силла. Частично лимонитизированные и осветленные породы распространяются глубже под маломощным козырьком траппов. Также видно, что осветленные породы, которые маркируют зону выклинивания окисления, слагают полосу, уходящую под траппы. Эти факты указывают на вероятную инфильтрацию окислительных вод, распространявшихся от древних поднятий, где траппы эродированы («трапповых окон»). Также можно предположить, что силлы играли роль водоупоров при формировании внутрипластового окисления в пермских песчаниках.

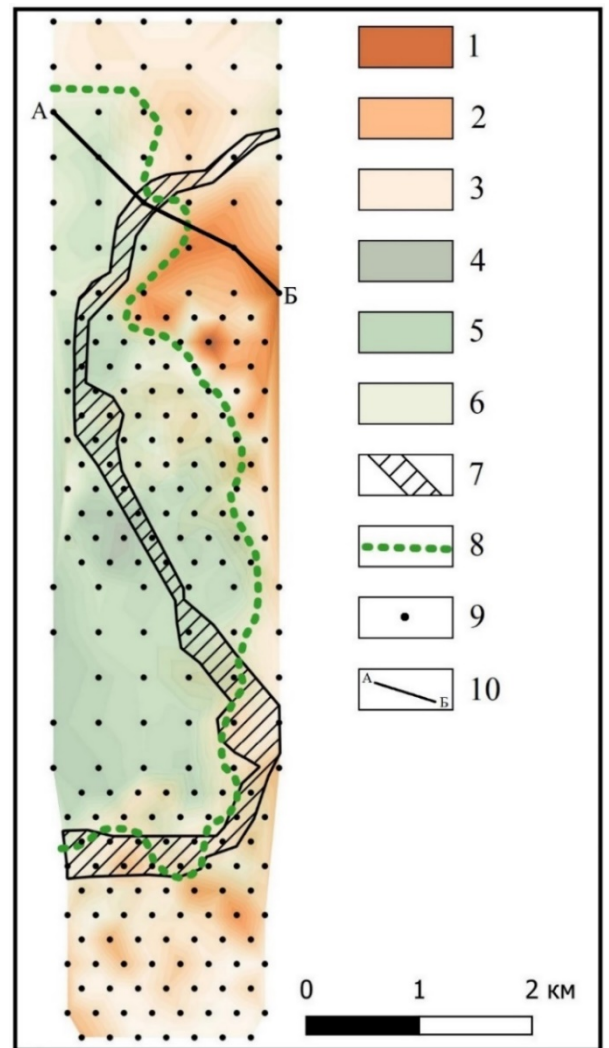


Рис. 2.14 Карта равных мощностей интервалов лимонитизации и осветленных пермских пород и залегающих в них силлов триасовых траппов площади Бестях.

1 – 3 – мощности лимонитизированных песчаников: 1 – от 36 до 55 м, 2 – от 18 до 35 м, 3 – от 1 до 17 м; 4 – 6 – мощности триасовых траппов: 4 – от 82 до 112 м, 5 – от 22 до 81 м, 6 – от 1 до 21 м; 7 – полоса осветленных пород пермской толщи, маркирующая зону выклинивания пластового окисления; 8 – граница распространения силла; 9 – скважины; 10 – линия геологического профиля.

На геологическом профиле показано сложное строение зоны пластового окисления и осветления (Рис. 2.15). Надо отметить, что окисление захватывает песчаники перми и подстилающие породы кембрия.

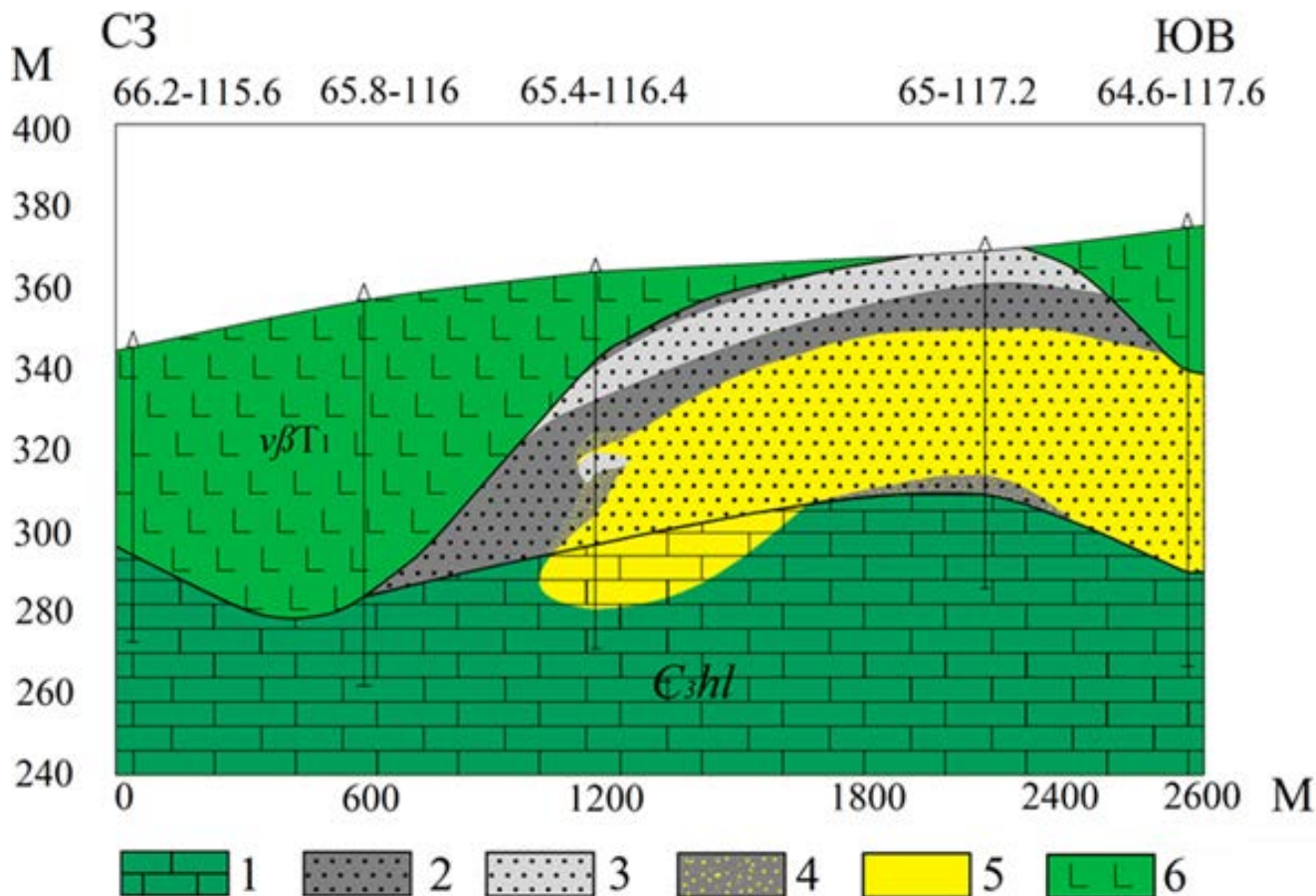


Рис. 2.15 Геологический профиль на севере площади Бестях, отражающий зоны пластового окисления. 1 – терригенно-карбонатные отложения холомолохской свиты кембрия; 2 – пермские сероцветные угленосные песчаники; 3 – осветленные песчаники перми; 4 – частично лимонитизированные песчаники перми; 5 – полностью лимонитизированные породы; 6 – силлы триасовых габбро

В Мало-Ботуобинском и других алмазоносных районах Якутии в венд-кембрийской толще широко распространены древние, в том числе каменноугольного возраста, захороненные коры выветривания [13]. В них установлены повышенные концентрации скандия, ванадия, кобальта, никеля, лантана и церия [16, 17]. Материал кор выветривания вполне мог попадать в область питания инфильтрационных артезианских бассейнов триасового и более молодого возраста и служить источником рудообразования.

В пределах рассматриваемой площади на горизонты выветривания и подстилающие их терригенно-карбонатные породы холомолохской свиты накладываются трещинное и пластово-трещинное окисление в виде лимонита и гематита (Рис. 2.16).



Рис. 2.16 Распространение гидроксидов железа по тектоническим трещинам и слоям глинистых доломитов в кровельной части холмологской свиты верхнего кембрия. Фрагмент разреза по керну по скважине №. 66.2-116.4 интервал -90-94 м

Полученные данные позволяют предположить, что выделенные участки выклинивания зон пластового и трещинно-пластового окисления могут быть потенциально рудоносными. По аналогии с известными месторождениями песчаникового типа и в палеодолинах в них могут быть концентрации редких и рассеянных элементов – ванадия, скандия и рения. Известно, что это базитофильные элементы [29, 42], следовательно, источником их вполне могли быть распространенные в районе триасовые вулканические туфы основного состава и силлы траппов. Также характерны повышенные фоновые концентрации этих элементов в тяжелых нефтях и битумах [43, 50, 56]. Широкое распространение битуминозных пород показано выше.

Таким образом, на контакте сероцветных угленосных пород и осветленных окисленных песчаников перми, а также битуминозных и окисленных пород кембрия вероятны концентрации ванадия и скандия. Можно предположить концентрации рения, для которого есть много общего в геологическом строении рассматриваемой территории с Брикетно-Желтухинским уран-рениевым месторождением, роллоподобные залежи которого локализованы в каменноугольных терригенных отложениях южного крыла Московской синеклизы. Их генезис связывают с пластовым окислением [6].

Глава 3 РУДНЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СКАНДИЯ И СОПУТСТВУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ В ДРЕВНИХ КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ НАКЫНСКОГО И СЮЛЬДЮКАРСКОГО АЛМАЗОНОСНЫХ ПОЛЕЙ

В данной главе приведены доказательства второго защищаемого положения: впервые установлены признаки и перспективные геохимические ореолы повышенных концентраций скандия и сопутствующих элементов в Сюльдюкарском и Накынском алмазоносных полях в корях выветривания каменноугольного и триас-юрского возраста.

Известно, что содержания скандия в качестве попутного компонента в рудах других металлов колеблются от 41 до 100 г/т и более [66, 67]. На гигантском редкометалльном месторождении Томтор – в карбонатитах и развитых по ним корях выветривания – средние содержания скандия составляют 200 г/т, в промышленных рудах – 500 г/т [47, 59]. В этой связи за условное минимально-промышленное содержание скандия в корях выветривания можно принять величину $C_{Sc} = 100$ г/т при кларке в глинистых породах 12 г/т и базитах – 24 г/т.

В Сюльдюкарском поле среди 4081 РФА пробы только 12 имеют содержания Sc выше 100 г/т, и лишь 19 выше 50 г/т (Таблица 3.1). Из 19 проб 17 находятся в ближайшем околотрубье Сюльдюкарского тела.

Таблица 3.1 - Содержания Sc, V, Ce, Pr, Nd, Nb, Ni и Co, превышающие 50 г/т в пробах Сюльдюкарского поля

Сква- жина	Глуби- на, м	Литология	Sc	V	Ce	Pr	Nd	Nb	Ni	Co
12-22	40	Кимберлит	96	356	308	84	256	202	4302	378
12-22	102	Кимберлит	143	365	1585	118	303	394	2608	188
12-22	112	Кимберлит	128	268	1598	123	336	249	1509	93
12-22	126	Кимберлит	165	321	69	106	138	100	2600	312
12-26	175	Кимберлит	105	314	69	2	28	21	582	30
12-26	195	Кимберлит	50	337	65	2	14	13	164	49
12-26	286	Кимберлит	83	307	62	1	27	15	138	51
134-98	59.1	Песчаник	123	301	48	1	11	7	94	75
148-104	101	Доломит	84	272	45	0	27	9	73	42
16-22	30.3	Кимберлит	164	294	1097	51	142	167	1661	166
20-20	33.2	Глины	71	474	413	106	183	367	677	541
20-22	37	Кимберлит	108	372	53	2	21	14	103	22
20-22	61	Кимберлит	60	334	64	0	29	14	146	46
20-22	77	Кимберлит	107	302	53	5	23	15	210	55
20-22	107	Кимберлит	61	229	58	2	28	41	166	37

Окончание Таблицы 3.1

Сква- жина	Глуби- на, м	Литология	Sc	V	Ce	Pr	Nd	Nb	Ni	Co
20-22	123	Кимберлит	106	347	57	0	29	16	139	55
24-22	38.5	Доломит	144	796	428	84	294	336	666	604
32-18	41.8	Мергель	205	447	245	75	110	190	414	51
32-20	53	Кимберлит	156	471	864	99	422	371	2932	634

Примечание: анализы РФА выполнены в ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) по отобранным геологами ВГРЭ пробам.

Важно отметить, что помимо скандия в этих пробах отмечены повышенные содержания V, Ce, Pr, Nd, Nb, Ni и Co, которые можно считать попутными для потенциального месторождения.

Среди этих проб для потенциальной добычи скандия наиболее интересны те, которые слагают верхнюю, наиболее выветренную и глинистую часть трубки. Исходя из мощности, перекрывающих кимберлит, юрских отложений приблизительно в 30-40 метров, к сильно выветренным можно отнести пробы, глубина которых до 45м. Не менее важным является пространственное распределение повышенных содержаний скандия (Рис. 3.1).

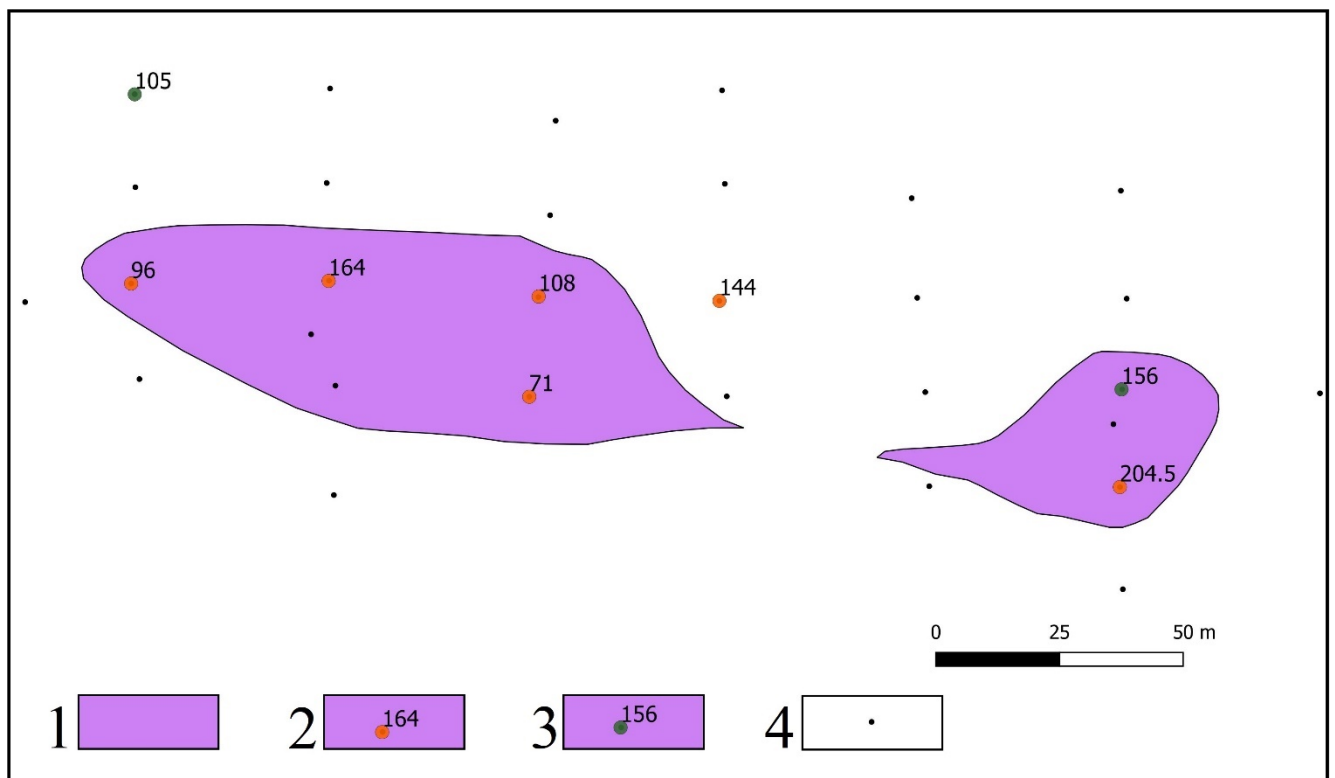


Рис. 3.1 Положение повышенных содержаний Sc в околотрубье Сюльдюкарского кимберлита. 1 – выход на поверхность Сюльдюкарского тела, 2 – содержания Sc в г/т из проб, отобранных из кор выветривания, 3 – содержания Sc в г/т из проб, отобранных из кимберлитовых брекчий, 4 – скважины, без повышенных содержаний Sc.

Все 17 проб с повышенным содержанием скандия, находящиеся в ближнем околотрубочном пространстве Сюльдюкарского тела отобраны из 7 скважин. Наиболее интересной является скважина 12-22 (Рис. 3.2).

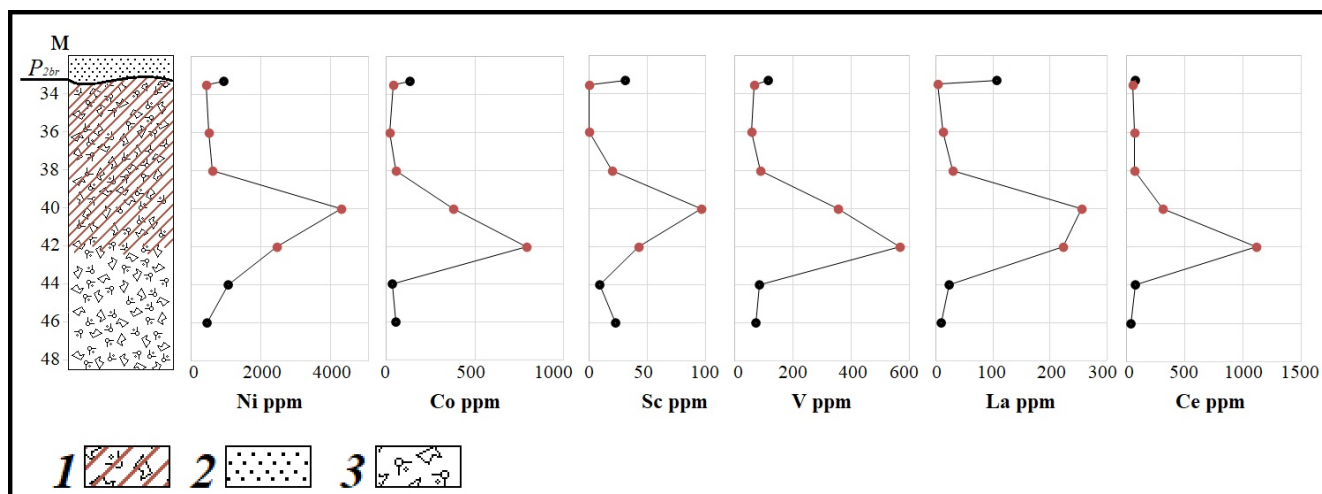


Рис. 3.2 Распределение Ni, Co, Sc, V, La и Ce (в г/т) в породах древней коры выветривания (заштрихованы) по Сюльдюкарским кимберлитам в скв. 12-22. 1 – кора выветривания по кимберлиту, 2 – песчаники боррулойской свиты, 3 – неизменённые кимберлитовые брекчии. Примечание: Пробы отобраны геологами Вилюйской геологоразведочной экспедиции АК «АЛРОСА». РФА-анализы выполнены в лаборатории ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО).

На рисунке 3.2 видно, что наибольшие содержания полезных компонентов тяготеют к нижней части коры выветривания. Исходя из распределения Ni, Co, Sc, V, La и Ce по мощности и в пространстве можно локализовать повышенные концентраций скандия и попутных компонентов.

В Накынском кимберлитовом поле проанализировано распределение скандия и ряда других элементов по 46763 рентгенофлуоресцентным анализам (РФА). Из них в 48 пробах содержания скандия превысило 100 г/т, в том числе, в карбонатных породах нижнего палеозоя 8 проб, в триасовых корах выветривания – 5 и в породах дяхтарской свиты – 27. Высокие содержания скандия по результатам ICP MS анализам определены в ряде проб, отобранных из магматических пород Накынского поля [27]. Так, в докимберлитовых дайках базитов из 11 анализов в двух пробах содержание скандия составило (г/т) 331 и 400, в силах в 3 из 4 анализов – 369, 372 и 407; в посткимберлитовых базитах трубки Нюрбинская из 12 проб в 5 случаях – 366, 423, 424, 431, 437, 480; в монзонит-порфирах той же трубки в трех проанализированных пробах оно составило 181, 199 и 479.

Концентрационные аномалии скандия в дяхтарской свите локализованы в узлах пересечения разломов, которые, в том числе, выполнены среднедевонскими дайками и эруптивными брекчиями основного состава (Рис. 3.3). Эти тела базитов могли быть локальными источниками повышенных концентраций скандия при формировании по ним кор выветривания.

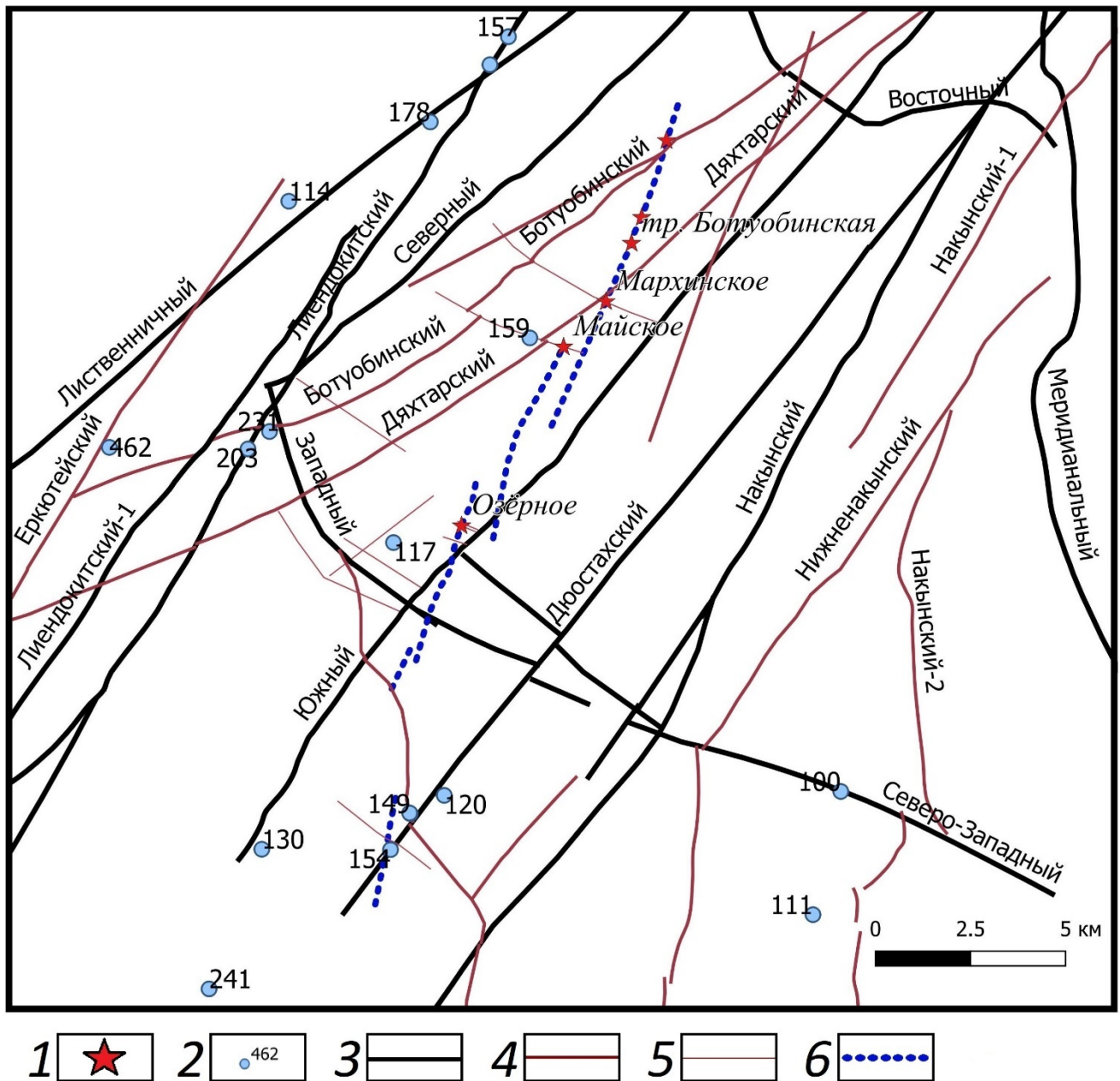


Рис. 3.3 Положение концентрационных аномалий скандия в разломных структурах Накынского поля (Составлена автором с учетом *gis*-данных, предоставленных геологами ВГРЭ) учетом данных. 1 – известные кимберлитовые тела; 2 – разрезы дяхтарской толщи, в которых содержание *Sc* выше 100 г/т; 3–6 – осевые зоны разрывных нарушений, выделенные по данным магниторазведки, сейсморазведки и картирования микротектонических нарушений: 3 – высокого порядка, 4 – среднего порядка, 5 – низкого порядка, 6 – сегменты рудоконтролирующего Диагонального разлома.

По РФА анализ 9808 проб, взятых из пород дяхтарской свиты Накынского поля, средние содержания скандия составили 14.25 г/т, в 938 пробах они превысили 30 г/т, в 132 оказались больше 50 г/т. Абсолютное большинство проб с аномальными концентрациями скандия в

дяхтарской свите представлено глинами. В табл. 3 приведены результаты анализов, где содержание скандия в дяхтарской свите превышает 100 г/т.

Дяхтарская свита сложена преимущественно глинистым материалом монтмориллонит-гидрослюдистого состава с обломками подстилающих карбонатных пород – осадками ближнего сноса и переотложения материала кор выветривания [7]. В ее разрезах преобладают существенно глинистые породы и выделены следующие типы отложения [7, 41]: русловые, в том числе, конусов выноса и внутрикарстовых временных водотоков; делювиальные – пологих склонов и их подножий; проточных озёр; застойных, часто зарастающих вторичных водоёмов поймы. В полных разрезах мощность толщи колеблется от 17–20 до 40–85 м. Характерно, что в верхней части разрезов толщи отмечаются наложенные в виде пятен и прожилков гидроксиды железа. Подобные выделения отмечены и в подстилающем элювии триасового возраста [41]. Эти факты указывают на процессы древнего грунтового окисления.

В центральной части Накынского кимберлитового поля закартированы Дюлюнг-Дяхтарская и Уолбинская депрессии дяхтарского времени [8]. В Дюлюнг-Дяхтарской впадине сосредоточены крупная Нюрбинская алмазная палеороссыпь и коренные месторождения и рудопроявления алмазов [8]. Повышенные концентрации скандия (выше 100 г/т) расположены, преимущественно, на палеоводоразделах Дюлюнг-Дяхтарской впадины. Пробы с аномальными концентрациями скандия (>100 г/т) отобраны с глубин от 32,4 до 111,6 м и по большей части представлены глинами (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Аномальные концентрации скандия (выше 100 г/т) в породах дяхтарской свиты Накынского поля

№ пп	№ скважины	Глубина, м	Порода	Содержания Sc, г/т
1	340-345	77	Алевролит	241.1
2	364-3	93,9-98,8	Глина	130.2
3	364-2	74-79	Глина алевритистая	112.3
4	364-2	74	Глина карбонатная	100.6
5	390-341	62,9	Глина алевритистая	153.7
6	396-472	52,4	Глина алевритистая	462.5
7	396-472	42,4	Глина алевритистая	133.6
8	396-472	37,4	Глина алевритистая	130.2
9	396-472	32,4	Глина алевритистая	107.7
10	400-347	75-76	Глина	149.4
11	400-347	80,5-86,5	Глина	107.2
12	400-347,5	78	Глина	103.1
13	410-345	75	Глина	119.8
14	428-448	72,7	Глина алевритистая	203.4
15	428-448	77,7	Глина алевритистая	199.7
16	428-448	87,7	Глина алевритистая	141.2

Окончание таблицы 3.2

№ пп	№ скважины	Глубина, м	Порода	Содержания Sc, г/т
17	428-448	82,7	Глина алевритистая	115.1
18	436-448	70,7	Глина	231.3
19	460-255	47,7	Песчаник	111.1
20	464-383,2	106,4-111,6	Глина	151.1
21	478-488	49,7	Глина алевритистая	114.4
22	490-270	100	Глина	100.3
23	520-484	58-63	Глина	178.0
24	520-484	48-53	Глина	129.5
25	520-484	73-78	Глина	124.0
26	542-486	49,3-54	Глина	268.1
27	Ан Vtem N-54/15f	64,5-67,5	Глина	116.8

Примечание: РФА-анализы выполнены в ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) по пробам, отобранным геологами ВГРЭ АК АЛРОСА

В целом в Накынском кимберлитовом поле скважины, вскрывшие в дяхтарской толще повышенные концентрации скандия, расположены в северном, западном и южном обрамлении отмеченных впадин и в основном располагаются на удалении более 10 км от алмазоносных кимберлитов. В плане они обрамляют линейную зону, к которой тяготеют алмазоносные кимберлиты (Рис. 3.4).

Среди ряда рудных аномалий скандия выделяются три участка, внутри которых они прослежены на расстояние свыше километра. Эти участки локализованы в узлах пересечения Лиендокитского, Западного, Северного, Ботуобинского и Дюостахского разломов. На одном из них вскрыт концентрационный ореол скандия протяженностью около двух километров и шириной порядка 500 м, расположенный на юго-западе Накынского поля. (Рис. 3.5). Участок расположен в узле пересечения крупных Дюостахского и Западного разломов, выполненных девонскими дайками основного состава. По нашим данным в центр этого узла проецируется Диагональный разлом, контролирующий тела алмазоносных кимберлитов. Следует учитывать также, что именно в разломах северо-восточного простирания в Накынском поле и узлах их пересечения с другими нарушениями сосредоточены трубки взрыва щелочно-базитового состава [27].

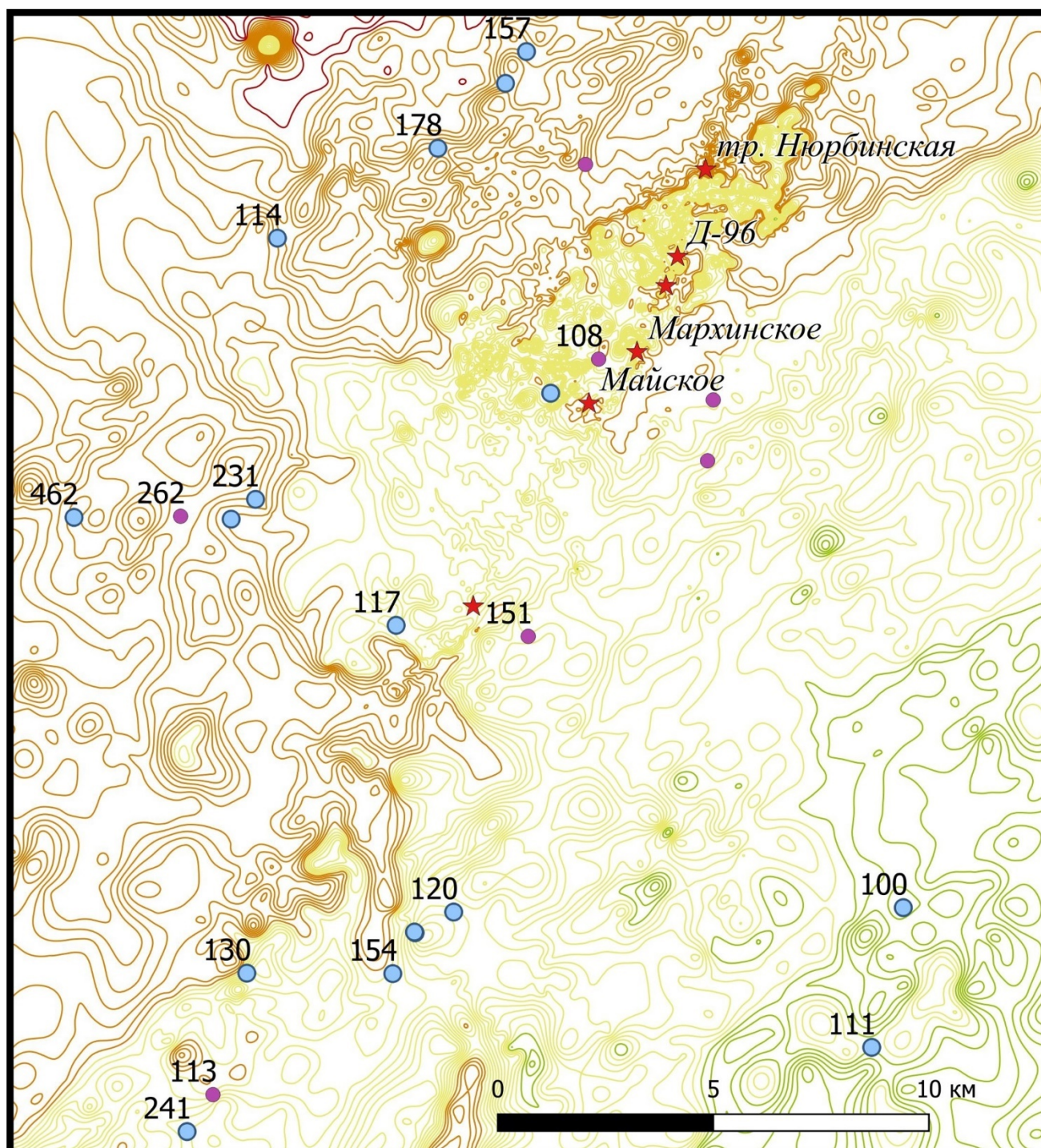


Рис. 3.4 Локализация проб с повышенными концентрациями скандия в дяхтарской толще и триасовой коре выветривания в обрамлении линейных кустов алмазонасных кимберлитов Накынского поля на фрагменте карты стратоизогипс кровли нижнего палеозоя (по данным ВГРЭ). 1 – известные кимберлитовые тела; 2–3 – содержания Sc выше 100 г/т: 2 – в дяхтарской толще 3 – в отложениях коры выветривания Т2-3; 4–6 – значения стратоизогипс кровли нижнего палеозоя: 4 – 162–216 м, 5 – 108–162 м, 6 – 54–108 м.

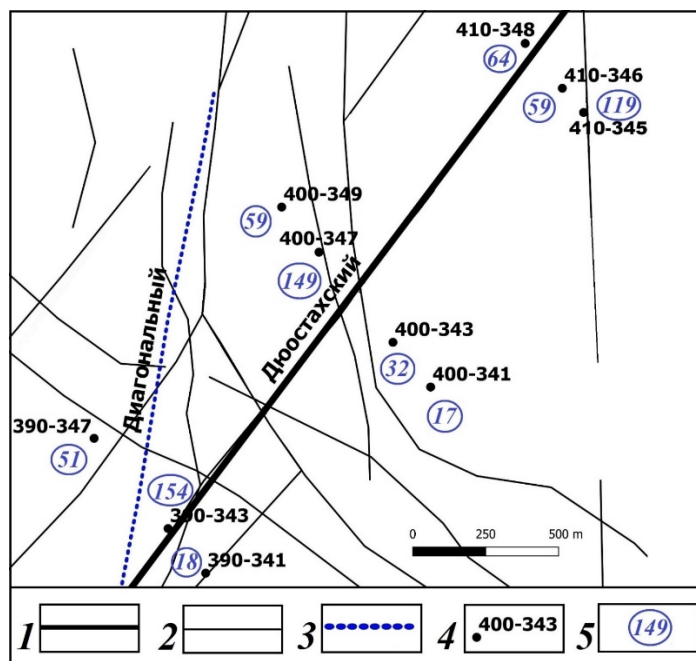


Рис. 3.5 Рудопроявление скандия в глинах дяктарской толщи в узле пересечения Западного, Дюостахского и Диагонального разломов Накынского поля с условным центром у скв. 400-347. 1 – Осевая зона дюостахского разлома, 2 – разломы II порядка, 3 – фрагмент диагонального кимберлитоконтролирующего разлома, 4 – номер поисковой скважины, 5 – содержания Sc в г/т.

Ореол повышенных концентраций скандия вытянут вдоль Дюостахского нарушения. Его длина до 3 км и ширина до 500 м определяет возможность прогнозирования здесь месторождения скандия. Следует отметить его асимметрию. На северо-запад концентрации скандия уменьшаются плавно, на юго-восток – резко. Это можно связать с более пологим палеорельефом к северо-западу от дайки габбро-долеритов, выполняющей Дюостахский разлом. В разрезе дяктарской толщи концентрации скандия ассоциируют с заметно повышенными концентрациями ванадия, кобальта, никеля, лантана и церия (Рис. 3.6).

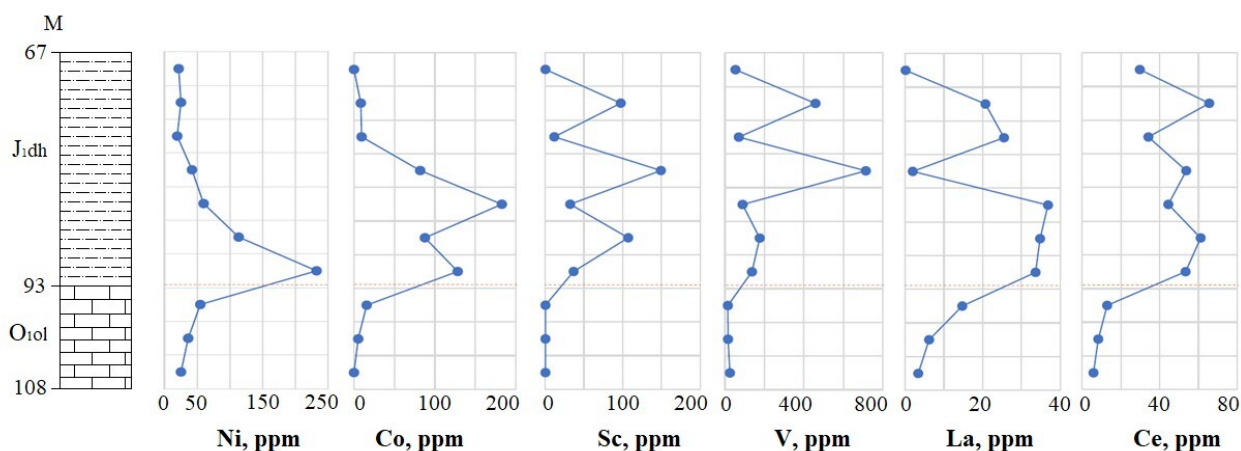


Рис. 3.6 Распределение Ni, Co, Sc, V, La и Ce в скв. 400/347 (данные РФА по пробам, отобранным геологами ВГРЭ), вскрывающей разрез коры выветривания в центральной части рудопроявления скандия в Накыньском поле. O_{1ol} – известняки олдондинской свиты нижнего ордовика, J_{1dh} – преимущественно глинистые отложения дяктарской толщи нижней юры.

Вторая группа сближенных на площади концентраций скандия расположена на западе Накынского кимберлитового поля в узлах пересечения Лиендокитского, Северного, а также Западного, Ботубинского и Лиендокитского разломов (Рис. 3.7).

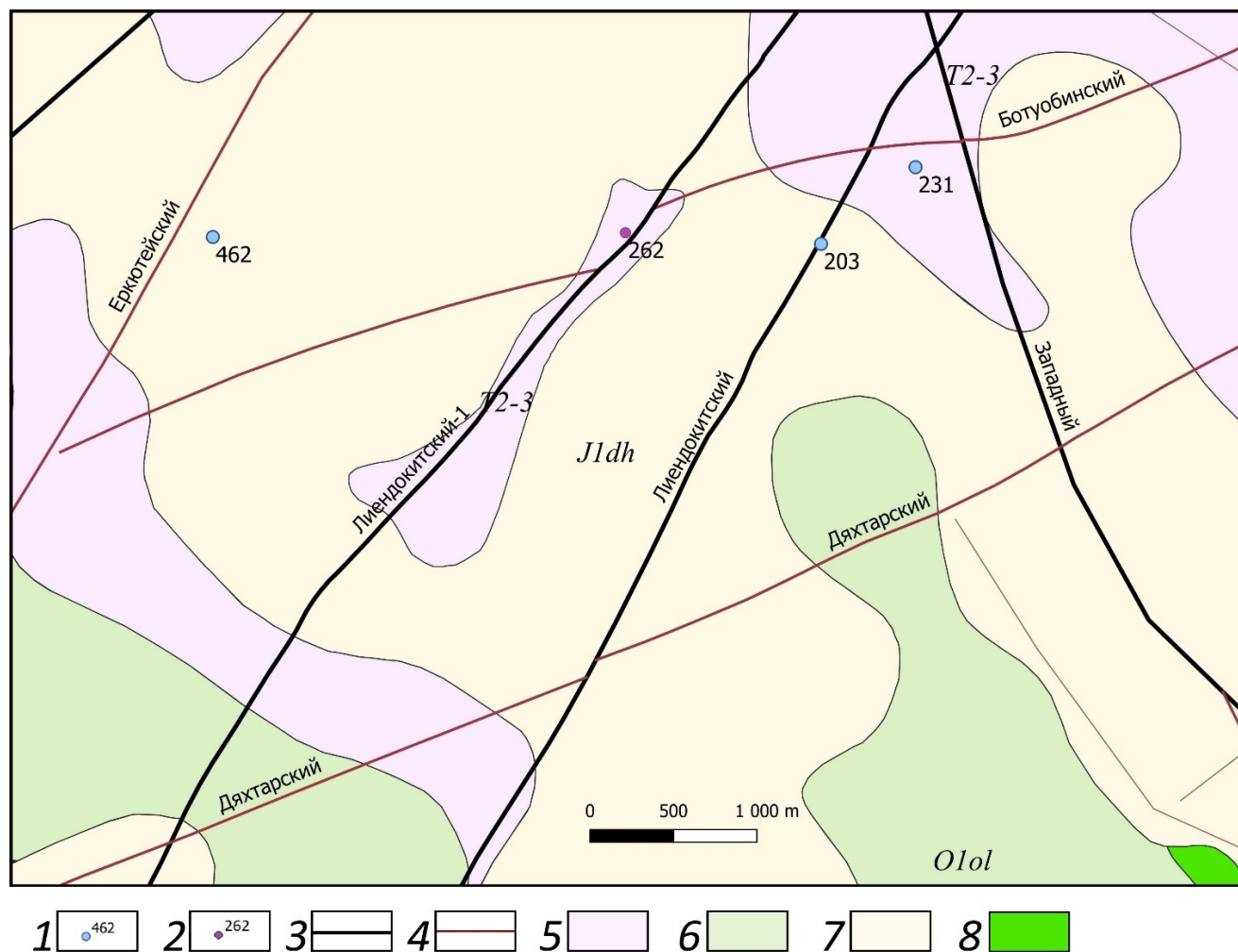


Рис. 3.7 Концентрации скандия на литолого-фациальной схеме отложений подошвенных горизонтов дяхтарской толщи и коры выветривания (Карта составлена геологами ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО) – Ответственный исполнитель Масленникова Э.А., составили Масленникова Э.А., Никитин В.В., Никитина Ю.Г., Чёбова М.П. 2013 г. с дополнениями автора).

1–2 – содержания Sc выше 100 г/т: 1 – в дяхтарской толще, 2 – в коре выветривания T_2 – J_3 ; 3–4 – разломы высокого (3) и среднего (4) порядков; 5–7 – образования, выходящие на поверхность в дяхтарское время: 5 – кора выветривания T_{2-3} , 6 – карбонатные породы ордовика, 7 – делювиальные отложений дяхтарской толщи, 8 – долериты D_{2-3}

Здесь следует отметить серию из четырех скважин, расположенных по широте в узлах пересечения упомянутых разломов, в которых содержания скандия превышают 200 г/т. Например, в скважине 396-472, в которой в четырех пробах, отобранных с глубин 30.4, 37.4, 42.4 и 52.4 м и характеризующих пачку в 22 м, содержания скандия составили, соответственно, 107.7, 130.2, 133.7 и 462.5.

При этом следует подчеркнуть, что рудные концентрации скандия в скважине 420-456 отмечены не в дяхтарской толще, а в подстилающей коре выветривания, развитой как по

карбонатным породам ордовика, так и базитам дайки (Рис. 3.8). То есть, на данном участке отмечаются повышенные концентрации скандия как *in situ*, так и в переотложенной коре выветривания. При этом ширина ореола концентраций скандия выше 100 г/т превышает четыре км, что сопоставимо с участком Буранный на Томторском комплексном месторождении, где скандий наряду с ниобием и REE образует промышленные скопления в рыхлых мезозойских отложениях озерной палеодепрессии [30, 34, 35, 36, 47, 59].

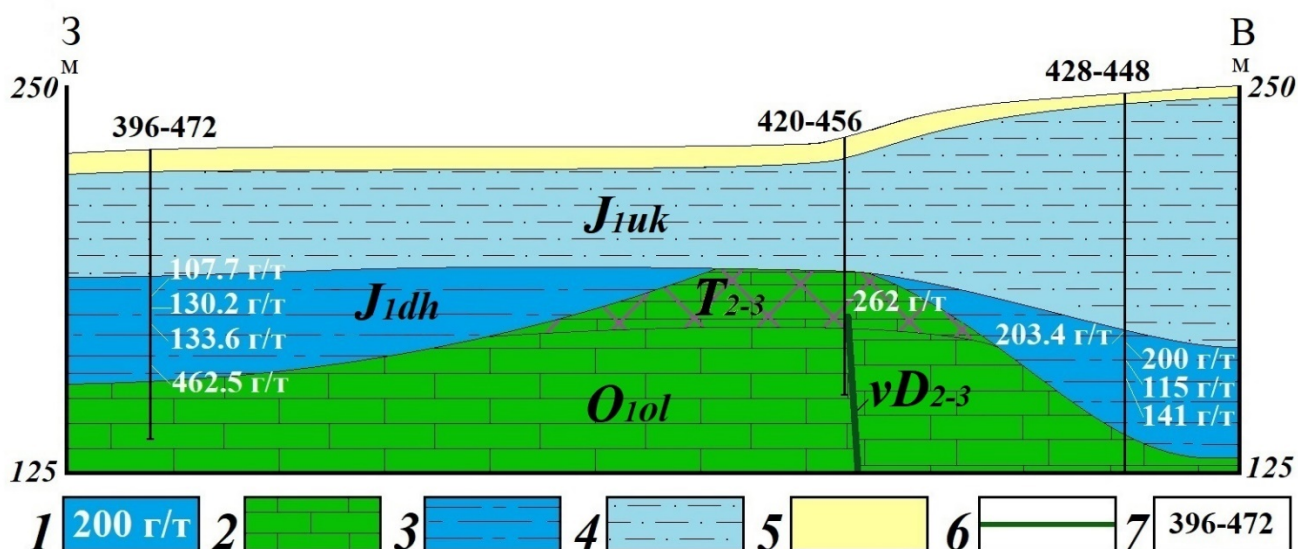


Рис. 3.8 Широтный геологический профиль по линии скважин 396-472 – 420-456 – 428-448 участка с концентрациями скандия Накынского кимберлитового поля

1 – содержание скандия в г/т; 2 – известняки олдондинской свиты; 3 – глины дяктарской толщи; 4 – алевролиты и алевропесчаники укугутской свиты; 5 – четвертичные отложения; 6 – дайка девонских долеритов; 7 – номер скважины. Штриховкой показана захороненная кора выветривания

В зону гипергенеза скандий поступает, освобождаясь, главным образом, из железомagneзиальных минералов, особенно из пироксенов и амфиболов, и активно сорбируется глинистыми минералами монтмориллонитовой и каолининовой группы и гидроксидами железа [67]. По этой причине скандий в экзогенных условиях способен накапливаться в сорбированном состоянии.

Имеются разные представления об экзогенной миграции и накоплении скандия в корах выветривания. Так, считается, что Sc при образовании кор выветривания ведет себя как малоподвижный элемент [57]. Его вынос из элювия не превышает 30-35% от исходного содержания в субстрате. Обычно вверх по разрезу коры выветривания возрастают как общее содержание скандия, так и его содержание в глинистой фракции. С другой стороны, имеются факты о дальнем переносе Sc и его соосаждении вместе с ураном, что показано на примере урановых месторождений Хиагдинского урановорудного поля Витимского плато [10].

В связи с установленными нами повышенными концентрациями Ni, Co, Sc, V, La и Ce в разрезе дяхтарской толщи, надо отметить, что аномальные концентрации названных элементов характерны и для рудопроявления скандия в коре выветривания позднедевонско-раннекаменноугольного возраста, развитой по кимберлитам Сюльдюкарского поля [16], а также в месторождениях скандия в латеритах по ультрабазитам в Австралии и Новой Каледонии [58, 65]. В них совместно со скандием отмечены рудные скопления кобальта и никеля. В то же время эти элементы являются маркерами ультрамафитов, что может указывать на вероятное наличие кимберлитового тела на участке данного рудопроявления.

Значительное число проб с повышенными концентрациями скандия и ряда сопутствующих элементов определяют большой поисковый потенциал на скандий Накынского поля. По всей видимости, скандий и другие металлы накапливались здесь в три этапа: во время поднятий в позднем девоне – раннем карбоне при формировании среднепалеозойских кор выветривания; в позднем триасе при образовании раннемезозойских кор выветривания и их ближнем переотложении; в поздне триасово-раннеюрское время – при инфильтрации агрессивных по отношению к скандию сульфатных окислительных грунтовых вод и его осаждении в глинах на щелочно-сорбционном барьере.

Таким образом, приведенные материалы доказывают второе защищаемое положение о промышленных перспективах на скандий и сопутствующие компоненты в Накынском и Сюльдюкарском алмазоносных полях Якутии.

Глава 4 ВЕРОЯТНЫЕ ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ СКАНДИЯ В ПОРОДАХ ДРЕВНИХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

В данной главе рассмотрены обоснования третьего защищаемого положения: По расчётам петрохимических модулей и корреляционных связей Sc с другими элементами обоснованы две формы его высоких концентраций в древних корах выветривания: сорбционная в монтмориллоните и изоморфная в тонкозернистом акцессорном ванадий-скандиеносном титаномагнетите.

Прежде чем говорить о вероятной минеральной форме нахождения скандия в Якутии и конкретно в дяхтарской свите Накынском поле, необходимо привести данные об его известных минеральных формах нахождения на примере известных типов руд (Таблица 4.1) и конкретно в рудных минералах (Таблица 4.2).

Таблица 4.1 - Содержание скандия в различных типах промышленных и потенциально промышленных сырьевых источников за рубежом [57]

Тип руд	Скандий, %	Скандий, г/т	
		От	До
Урановые	0,0005-0,01	5	100
Отходы их переработки	0,05-0,2	500	2000
Титаномагнетитовые	0,005-0,01	50	100
Вольфрамитовые	0,05-1,0	500	10000
Касситеритовые	0,02-0,22	200	2200
Цинковые	0,014-0,02	140	200
Цирконовые	0,001-0,08	10	800
Никельсодержащие коры выветривания	0,001-0,005	10	50
Бокситы	0,001-0,02	10	200
Красный шлам переработки бокситов	до 0,02	200	200
Фосфориты	0,0001-0,03	1	300
Глины	0,001-0,005	10	50
Зола углей	0,0005-0,06	5	600
Шлаки доменных печей	0,008-0,06	80	600

Примечание: таблица составлена Яниным [57] на основании работы Борисенко Л.Ф., Поликашина Н.С. [2] с дополнениями автора

Таблица 4.2 - Характеристика скандийсодержащих месторождений [57]

Тип месторождений	Sc ₂ O ₃ в руде (минералах), %	Sc ₂ O ₃ в руде (минералах), г/т	
		От	До
Титаномагнетитовые в пироксенитах, перидотитах	0,007-0,13	70	1300
Ильменитовые	0,007-0,015	70	150
Слюдисто-магнетит-флюоритовые с хризобериллом	0,005-0,02	50	200
Танталит-колумбитовые в кислых редкоземельных гранитах	≤0,003	0	30
Апатиты	0,005-0,01	50	100
Вольфрамитовые и касситеритовые	0,25 (вольфрамит)	-	2500
	0,13 (касситерит)	-	1300
Никелевые руды кор выветривания	0,001-0,005	10	50
Бокситы	0,006-0,01	60	100
Бурые железняки	0,001-0,014	10	140
Циркониевые и ильменитовые (россыпи и др.)	≤ 0,12 (циркон)	-	1200
Ураново-ванадиевые и медно-урановые	≤ ~ 0,05 (браннерит)	-	500
Фосфориты	0,001-0,03	10	300
Каменные и бурые угли	0,0002-0,0005	2	5
Глины (керамическое сырье)	0,001-0,005	10	50
Железо-марганцевые конкреции (океанические)	0,001-0,002	10	20
Руды массива Томтор	0,0073-0,2124	73	2124

Примечание: таблица составлена Яниным [57] на основании обобщения данных Л.Ф. Борисенко с дополнениями автора

Из приведенных в таблице результатов наиболее интересными типами руд с учётом геологического строения Накынской площади, являются титаномагнетитовые, никельсодержащие коры выветривания и глины.

Древние коры выветривания Якутии, в том числе и в Накынском поле, сложены главным образом монтмориллонитом с примесью других глинистых минералов и сидерита [14, 41]. Глинистый состав кор выветривания, очевидно, обуславливает их высокие сорбционные свойства.

В Накынском поле широко распространены переотложенные коры выветривания триас-раннеюрского возраста, относящихся к дяхтарской свите. Они представлены карбонатно-алевритно-глинистым материалом карстовых, делювиальных, аллювиально-пролювиальных и озерных отложений, выполняющих пологие впадины древнего тектоно-эрозионно-карстового рельефа [7]. Коры выветривания этого возраста затрагивают и позднедевонские кимберлиты и девонские траппы. В рассматриваемом районе, вероятно, проявлялось интенсивное выветривание и в раннекаменноугольное время, широко распространенное в Западной Якутии.

Проявлений триасового магматизма, характерного для большей части Западно-Якутской алмазоносной провинции, в Накынском поле нет [49]. Здесь широко распространены силлы и

особенно дайки среднепалеозойских траппов, а также эруптивные брекчии базитов и единичные тела также среднепалеозойских монцонит-порфиров [28].

Наличие основных, ультраосновных и щелочных пород, которые подвергались достаточно глубокому выветриванию, предопределило возможность накопления в среднепалеозойских и мезозойских корах выветривания скандия и попутных компонентов. Разная степень выветривания различных по составу и генезису пород предопределила неравномерность распределения концентраций скандия, что находит отражение в петрохимических данных.

Для определения того, какими конкретно типами пород внутри глинистой дяхтарской свиты ассоциирует Sc, использован анализ петрохимических модулей, позволяющий классифицировать разности внутри свиты на основании макрокомпонентов. За основу взяты: гидролизатный и алюмокремнёвый модуль, общая нормативная щёлочность, Fe/Mn и Ti/Zr индикаторы [45].

Гидролизатный модуль вычисляется по формуле $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO / SiO_2$, Показатель дает возможность разделять терригенные и глинистые отложения по содержанию либо продуктов гидролиза (каолинит, оксиды алюминия, железа, марганца), либо кремнезем. Чем выше значения этого модуля, тем более глубокое выветривание претерпели исходные породы источников сноса [45]. При значении модуля меньше 0.1 речь идёт о кварцевых песчаниках и алевролитах, от 0.1 до 0.2 о слабоглинистых песчаниках и алевролитах, 0.2-0.3 соответствует глинистым песчаникам, 0.3-0.5 это глинистые породы, а значения выше 0.5 указывают на зрелые коры выветривания (гидролизатные породы). Из 9021 пробы дяхтарской свиты 42.1% относятся к глинистым породам, 30,7% к глинистым силицитам, 14,8 к слабоглинистым силицитам, 3,5% к силицитам и 8,9% к гидролизатным породам (Таблица 4.3) [12].

Таблица 4.3 - Соотношение проб с повышенным содержанием Sc в разных по петрохимическим модулям отложениях

Породы	Количество проб	Процент проб от общего числа	Процент проб с содержанием выше 100 г/т
Гидролизатные глинистые породы	806	8.9	82.76
Глинистые породы	3800	42.1	13.79
Глинистые силициты (кремнисто-глинистые сланцы)	2765	30.7	3.45
Слабоглинистые силициты	1331	14.8	0
Силициты (кремни, фтаниты, яшмы)	319	3.5	0
Всего	9021	100	100.00

Примечание: проанализировано 27 проб, содержание скандия в которых превышает 100 г/т.

В малочисленных гидролизатных породах, которые содержат либо каолинит, либо свободные оксиды алюминия, железа и марганца содержится 83% от всех проб с содержанием Sc выше 100 г/т; 17% относятся к глинистым породам и только 1 проба относится к глинистым

силицитам (кремнисто-глинистые сланцы), мезомиктовым и полимиктовым кварцевым песчаникам и алевролитам. В то же время, силициты и слабоглинистые силициты вообще не содержат повышенных концентраций скандия.

Алюмокремневый модуль, который зачастую дублирует гидролизатный модуль, также подтвердил, что большинство проб с повышенным содержанием скандия относится к гидролизатным породам, связанным с корами выветривания [12].

Общая нормативной щёлочности, или «полевошпатовый индикатор», указывает на стандартную смесь гидрослюд и полевых шпатов. Вычисляется по формуле $K_2O + Na_2O / Al_2O_3$. При значениях модуля выше 1 речь идёт о гиперщелочных породах, от 0.7 до 1,0 – высокощелочных, 0.4-0.7 – повышенно щелочные, 0.2-0.4 нормально щелочные. При всех значениях ниже 0.2 породы относят к гипощелочным (слабощелочным). Среди 9021 пробы дяхтарской свиты единичными являются пробы высоко и гиперщелочных отложений (Таблица 4.4), в то время как гипощелочные, нормально щелочные и повышенно щелочные представлены примерно поровну и составляют 99.5% всех типов пород. Большинство проб с повышенным содержанием Sc (79.31%) относятся к определенному типу – гипощелочным породам.

Таблица 4.4 - Соотношение проб с повышенным содержанием Sc с отложениями различной щёлочности

	Количество проб	Процент проб от общего числа (%)	Процент проб с содержанием выше 100 г/т (%)
Гиперщелочные	3	0.03	0
Высокощелочные	50	0.55	0
Повышеннощелочные	2357	26.13	6.90
Нормальнощелочные	3362	37.27	13.79
Гипощелочные	3249	36.02	79.31
Всего	9021	100	100.00

Fe/Mn фациальный индикатор показывает глубину осадкообразования и указывает на то, что большинство пород (72,4%) формировались в поверхностных условиях, однако 28% отложений по данному индикатору формировались в морском мелководье. Одна проба показала глубоководные условия формирования, что не сходится с палеогеографической характеристикой дяхтарского времени, а также палеогеологическими картами, но вероятнее всего это связано с переработкой нижележащей олдондинской свиты, представленной преимущественно морскими известняками.

Фациальный индикатор Ti/Zr указывает на дальность переноса вещества и основан на том, что при длительной транспортировке обломочной составляющей породы значения этого модуля уменьшаются вследствие лучшей сохранности циркона в сравнении с титансодержащими минералами. 69% проб с высоким содержанием скандия указывают на породы, которые не подвергались дальнему переносу, однако 31% проб, согласно модулю, явно дальнепривносные.

Такое большое значение не может быть погрешностью метода и показывает, что среди проб с повышенным содержанием Sc есть породы как ближнего, так и дальнего сноса.

Из менее показательных и результативных следует отметить упомянутый железистый модуль. При оценке выборки среди показателей с высоким содержанием Sc нет четкой взаимосвязи с породами определенной степени железистости. Однако отмеченные высокие концентрации скандия связана с повышенно железистыми породами, которые составляют половину от общей выборки (9021 проба) в дяхтарской свите (48.3%). Пятая часть (20.7%) относятся к нормально железистым и высоко железистым и только 10.3% к слабожелезистым породам.

Целесообразно рассмотреть петрохимические индикаторы на конкретном геологическом разрезе, составленном по наиболее перспективному на скандиевое оруденение участку, расположенному вдоль Ботубинского разлома между Еркютейским и Лиендокитским разломом (Рис. 3.8).

Здесь в скважинах 396-472 и 428-448 встречены интервалы, суммарной мощностью около 20 м, в которых по точечным пробам содержание скандия превышает 100 г/т. В скважине 396-472 между пробами с содержанием скандия 133.6 и 462.5 находится проба с содержанием в 56.95 г/т.

Согласно гидролизатному модулю все пробы с содержаниями больше 100 г/т и проба в 56.95 г/т относятся к зрелым корам выветривания. Показатель общей нормативной щёлочности соответствует слабощелочным, кроме проб с 56.95 и 107.7 г/т, которые относятся к нормально щелочным и не сильно отличаются от остальных по значению модуля щёлочности. Согласно Fe/Mn фациальному индикатору все пробы являются континентальными отложениями за исключением нижней (141 г/т), которая относится к мелководным отложениям, что скорее всего связано с положением в нижней части разреза и эрозией карбонатных пород олдондинской свиты ордовика. Ti/Zr фациальный индикатор относит все пробы к практически не перенесённым или к слабо перенесенным. Железистый модуль в данном разрезе относит все пробы к повышенно железистым, кроме пробы в 130.2 г/т в скважине 396-472 и 199.7 г/т в скважине 428-448. Однако разница весьма незначительна, так как к высокожелезистым относят значения в 1-3, а к нормальножелезистым 0.2-0.6 и значения в 1.03 и 0.59 соответственно отличаются от повышенно щелочных на незначительные 0.03 и 0.01.

Таким образом, по петрохимическим модулям большая часть концентраций скандия выше 100 г/т связана с глинистыми, повышенно железистыми породами зрелой коры выветривания, которые накопились в континентальных, слабощелочных условиях и не испытали значительного перемещения.

Имеющиеся аналитические данные позволяют подойти к решению вопроса о формах концентраций скандия в дяхтарской свите. Рассмотрим распределение макро- и микроэлементов,

имеющих наиболее контрастные значения, по трем группам: пробы с повышенным содержанием Sc; пробы, отнесённые по модулям к зрелым корам выветривания; все пробы дяхтарской свиты. Элементы, которые значимо отличаются в выборках представлены в таблице 4.5

Таблица 4.5 - Сравнение средних содержаний элементов в породах дяхтарской свиты Накынского кимберлитового поля

Средние содержания:	Макроэлементы в %			Микроэлементы в г/т (для микроэлементов указан кларк)				
	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Sc (12)	V (150)	Cu (55)	Rb (130)	Nb (13.6)
Проб с повышенным содержанием Sc (29)	1.5	0.1	3.7	157.1	429.1	251.4	30.4	31.3
Проб, отнесённых к зрелым корам выветривания по модулям (806)	2.6	0.1	1.1	27.9	155.7	119.6	52.1	15.0
Всех проб дяхтарской свиты (9022)	3.4	0.1	0.8	14.6	107.2	97.0	71.6	14.2

**Указаны кларковые содержания элементов по данным таблицы, составленной в отделе «Геоэкология и геохимическое картирование» ИМГРЭ. [68]*

Видно, что концентрации скандия в породах дяхтарской свиты сопровождаются концентрациями ванадия, меди и ниобия и деконцентрацией калия и рубидия. В породах переотложенных кор выветривания повышены концентрации скандия и меди как относительно общей выборки, так и относительно кларков. Содержания ванадия повышены только в высокоскандиевых пробах.

По расчёту коэффициентов корреляции по всем анализам установлен тренд увеличение положительной связи скандия с ванадием и титаном по мере роста его содержания (Рис. 4.1).

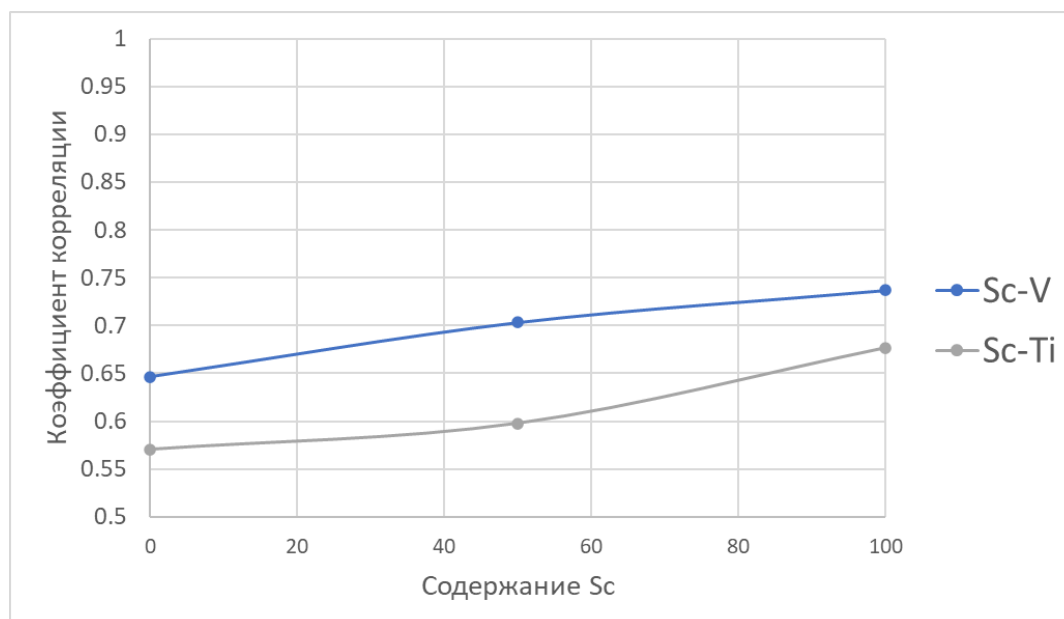


Рис. 4.1 Увеличение коэффициентов корреляции V и Ti со Sc с ростом его концентраций.

Коэффициенты корреляции увеличиваются в пробах, содержащих скандий, больше 50 г/т. Скорее всего, это указывает на нахождение скандия и ванадия в одном минерале, предположительно, в установленном [41] в дяхтарской свите, титаномagnetите.

Коэффициенты корреляции скандия с рубидием и калием имеют обратный тренд (Рис. 4.2).

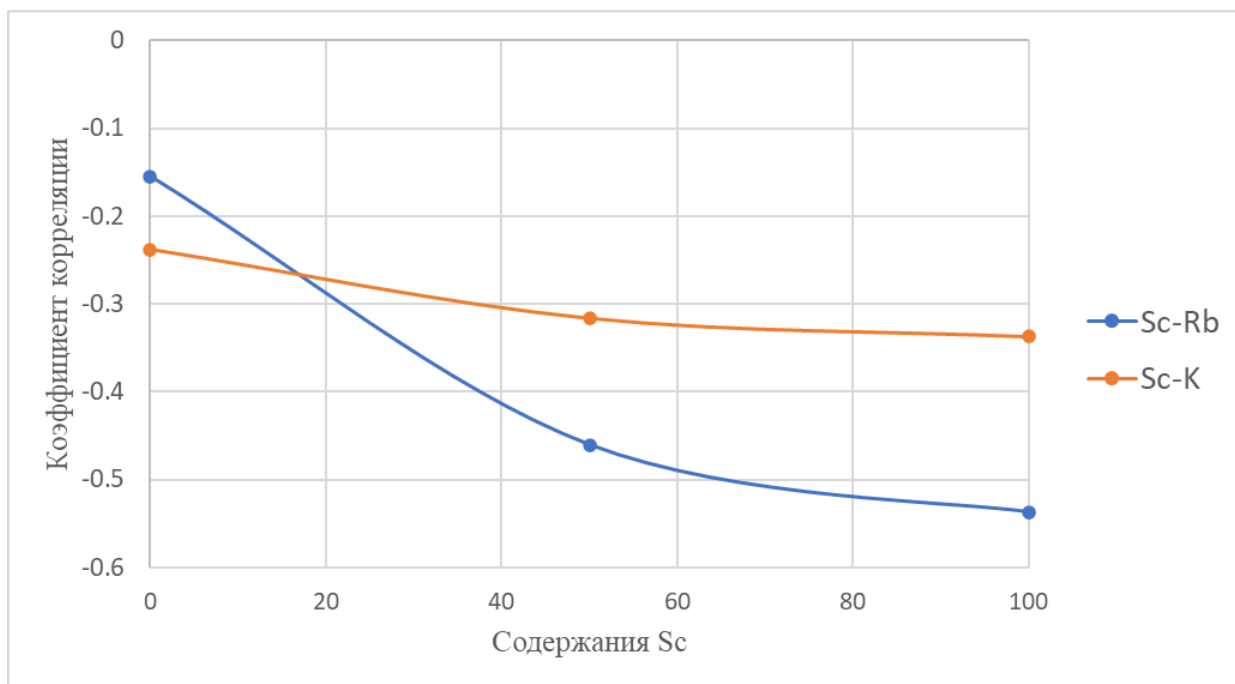


Рис. 4.2 Уменьшение коэффициентов корреляции K и Rb со Sc с ростом его концентрации.

Видно, что корреляция скандия с калием практически не меняется, а с рубидием увеличивается обратная зависимость. Возможно, это связано с тем, что рубидий вместе с калием входит в кристаллическую структуру гидрослюд, а скандий, вероятно, сорбировался монтмориллонитом. Надо отметить, что рассматриваемые зрелые коры выветривания имеют монтмориллонит-гидрослюдистый состав [41].

По коэффициентам корреляций скандия с калием, рубидием и ванадием можно считать, что форма нахождения рудных концентраций скандия предполагается в виде сорбции в монтмориллоните и тонкозернистом ванадий-скандиеносном титаномagnetите [12].

Однако, необходимо учесть исследования Л.Ф. Борисенко [3] о скандиеносности различных минеральных фаз в гипербазитах. В работе утверждается, что: «Главным минералом-концентратором скандия является диопсид, содержание Sc_2O_3 в котором составляет 0,012—0,020%. Диопсиды из наиболее распространенных среднезернистых пироксенитов, а также крупнозернистых пироксенитов и гигантозернистых шлировидных обособлений пироксенита содержат примерно одинаковые количества скандия». Помимо диопсида, повышенными концентрациями обладает роговая обманка (0,01—0,02% Sc_2O_3): «Вероятно, главная масса роговой обманки образовалась за счет замещения диопсида и унаследовала содержащийся в нем скандий. Горнблендиты из контактовых зон пироксенита с габбро содержат примерно столько же

скандия, сколько неамфиболизированный пироксенит». В то же время титаномагнетит отмечен как минерал с пониженными содержаниями скандия в 30 раз в связи с более поздней кристаллизацией.

Для более корректной оценки формы нахождения Sc в дяхтарской свите необходимо было бы провести микрозондовый анализ. Однако, на данный момент это сделать не представляется возможным, так как наиболее перспективные зоны, в которых обнаружены повышенные концентрации скандия как по мощности, так и по протяженности, были пробурены более 10 лет назад и дубликатов проб не сохранилось. Анализ любых случайно выбранных проб дяхтарской свиты не имеет высокой степени ценности и достоверности, так как из более чем 9 тысяч проб дяхтарской свиты содержания выше 100 г/т были обнаружены лишь в 27 пробах.

Глава 5 НАРУШЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПОМОРФНЫХ УЛЬТРАБАЗИТАМ, БАЗИТАМ И КАРБОНАТИТАМ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ НИЖНЕГО ПАЛЕОЗОЯ, ВМЕЩАЮЩИХ КИМБЕРЛИТЫ ЯКУТИИ

В данной главе приведены доказательства четвертого защищаемого положения: *Выявлены нарушения корреляционных связей фоновых содержаний V, Cr, Co, Ni, Zn, Zr и Sc в осадочных породах нижнего палеозоя, вмещающих кимберлиты Накынского и Слюдякарского алмазоносных полей. Они могут быть использованы в качестве нового поискового признака кимберлитов на закрытых поисковых площадях.*

Нарушения корреляции определённых элементов вблизи кимберлитов были выявлены в результате изучения возможных форм переноса скандия и проверки гипотезы о кимберлите как вероятном источнике скандия.

Первоначально неоднородность корреляции микроэлементов в фоновом и околотрубочном пространстве была отмечена на примере Слюдякарского поля.

Стоит заранее оговориться, что значения коэффициентов корреляции пар элементов брались по методу Спирмена, так как для всех пар элементов после отбраковки ураганных содержаний и другой подготовки выборки распределение не соответствовало нормальному. Однако, даже при подсчёте по методу Пирсона наблюдается картина нарушения корреляции вблизи кимберлита.

Кимберлиты локализованы в узле пересечения рудовмещающего крутопадающего запад-северо-западного сбросо-сдвига и также крутозалегающего север-северовосточного сдвига [19, 20] (Рис. 5.1, Рис. 5.2). В результате картирования признаков тектонических нарушений, отражающих условия сжатия или растяжения, на участке Слюдякарского кимберлитового тела установлены сектора сжатия и растяжения.

По данным ICP AES и РФА содержания макрокомпонентов отложения холмолахской свиты верхнего кембрия относятся к карбонатно-глинистыми, алевроитисто или песчанисто карбонатным породам. Преобладают доломиты, имеются прослои известняков.

Для определения фоновых содержаний взяты результаты штучного опробования. Частое переслаивание отмеченных пород предполагает использовать для геохимического анализа объединенные выборки, включающие как карбонатные, так и глинистые разности пород.

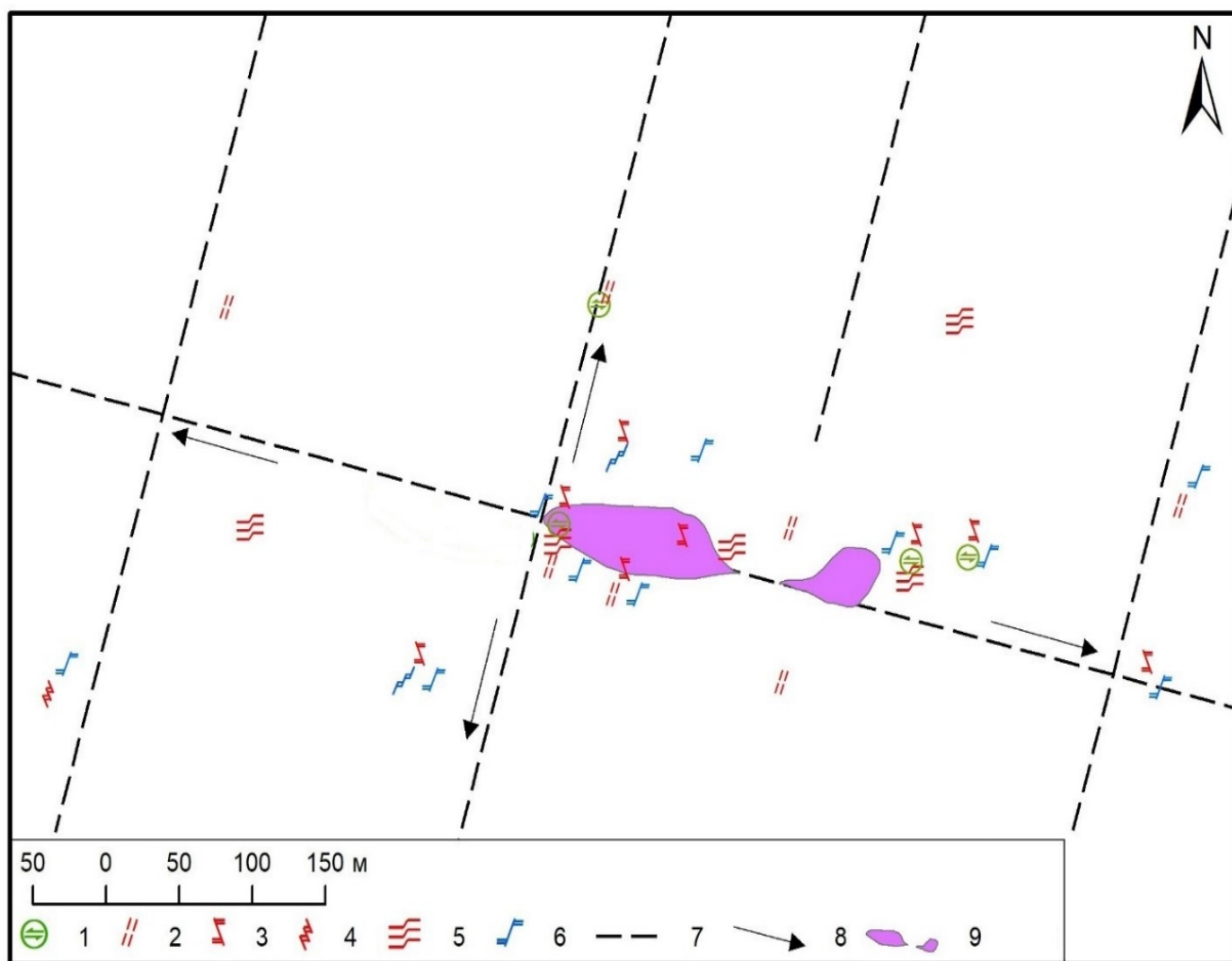


Рис. 5.1 Структурный схема участка Сюльдюкарского кимберлитового тела [20].

1 – зеркала скольжения с горизонтальными бороздами; 2 – рассланцевание; 3 – микровзбросы; 4 – системы микровзбросов; 5 – микроскладки волочения; 6 – микросбросы; 7 – осевые части сдвиговых швов; 8 – направления движения сдвигов; 9 – кимберлиты.

Методика обработки аналитического материал включает семь процедур, последовательность выполнения которых иногда может незначительно нарушаться (пункт 3 может дополнительно быть уточнён после пункта 6):

1. разделение проб на околосимберлитовые, включающие локальные участки (до 100 м от кимберлита) и фоновые (дальше 200 м от тела в пределах поля);
2. отбраковка проб на основании содержаний макроэлементов для снятия влияния процессов древнего выветривания;
3. выбор типоморфных микроэлементов для анализа, исходя из геологического строения и особенностей площади;
4. расчет закона распределения в выборках и расчёт средних и медианных значений для каждого элемента;
5. отбраковка и исключение экстремальных значений, составляющих больше медианного в 10 раз для снятия заведомо аномальных концентраций;

6. расчет коэффициентов корреляции и составление корреляционных матриц;
7. интерпретация и сравнение данных по фону с околосимбиритовыми участками и поисковыми площадями, в том числе, где вероятно наличие трубки взрыва.

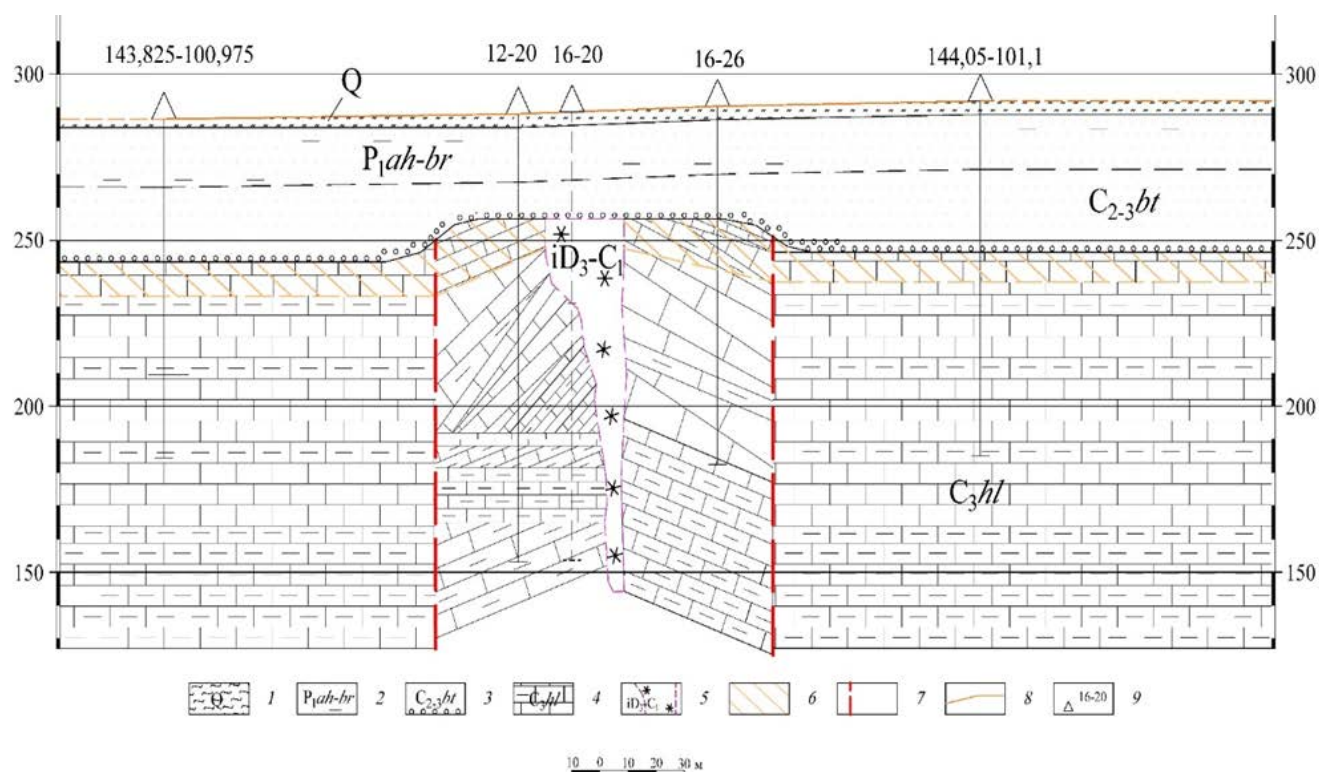


Рис. 5.2 Геологический профиль поперечный к рудовмещающему сдвигу в районе Сюльдюкарского кимберлитового тела [20]

1 – четвертичные отложения; 2–3 – терригенные угленосные отложения: 2 – нижнепермские ахтарандинской и боруллойской свит; 3 – каменноугольные ботубобинской свиты; 4 – верхнекембрийские терригенно-карбонатные отложения холмолахской свиты; 5 – кимберлиты; 6 – древняя кора выветривания; 7 – разломы; 8 – рельеф; 9 – устья скважин и их номера. Нарушенное залегание и углы падения пород кембрия установлены по документации керна.

В Сюльдюкарском поле из скважин, удаленных от кимберлитов более чем на два км и представляющих геохимический фон, проанализировано 77 анализов ICP AES проб, включающих 31 проб по сероцветным терригенно-карбонатным породам и 46 – по красноцветным карбонатно-глинистым разностям. Из околотрубочного пространства использовано 58 анализов из скважин, отстоящих от кимберлитов от 20 до 140 м. При расчете средних значений из выборок были удалены пробы с ураганными концентрациями элементов, принятыми более 10 медианных значений.

Для определения сопоставимости результатов двух разных типов анализов ICP AES И РФА рассчитаны средние содержания. Для рассматриваемых и других элементов они практически совпадают (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 - Средние содержания элементов в фоновых пробах Сюльдюкарского поля и вблизи кимберлита по данным РФА и ICP (без ураганных содержаний)

Фоновое пространство								
Анализ (кол-во проб)	Cr	V	Co	Ni	Sr	Ba	Zn	Nd
ICP (93)	59.53	61.73	12.16	36.95	189.00	204.94	44.82	13.55
РФА (395)	58.52	62.14	10.65	31.52	105.62	278.58	45.33	25.14
Околотрубочное пространство								
Анализ (кол-во проб)	Cr	V	Co	Ni	Sr	Ba	Zn	Nd
ICP (48)	72.64	57.77	7.04	34.46	124.60	119.85	46.44	20.75
РФА (243)	59.77	41.02	7.15	31.41	126.76	244.61	41.74	23.54

Важно отметить, что средние значения совпадают как для фоновых содержаний удаленных от кимберлитов участков, так и в ближайшем околотрубочном пространстве. Они соответствуют кларковым значениям для осадочных пород.

Для Сюльдюкарского кимберлита, который некоторые исследователи относят к карбонатит-кимберлиту [40], стоит добавить в выборку Се. Порядок определения анализируемых элементов, как уже было сказано выше, может быть как до составления корреляционных матриц, так и после, но обязательно с учетом геологического строения.

На основании значений коэффициентов корреляции в фоновом пространстве и в околотрубочном пространстве Сюльдюкарского кимберлита была построена диаграмма соотношений коэффициентов корреляции (Рис. 5.3).

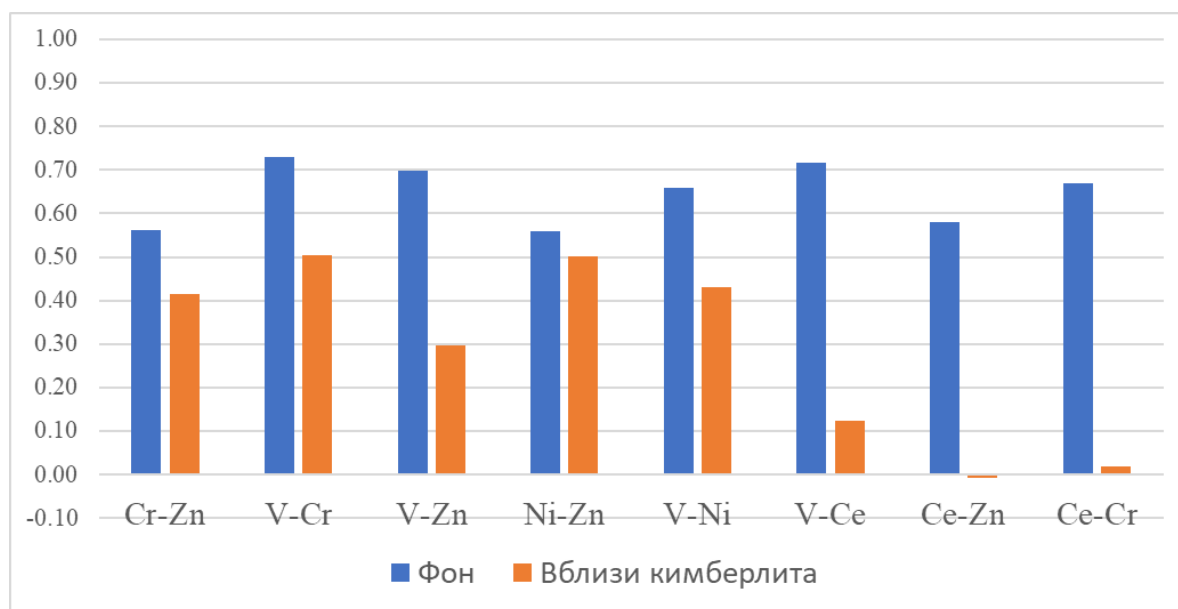


Рис. 5.3 Соотношения коэффициентов корреляции в фоновом (395 анализов) и околотрубочном (243 анализа) пространстве Сюльдюкарских кимберлитов по данным РФА

Видно, что для таких пар элементов как V-Cr, V-Zn, V-Ni, V-Ce, Ce-Zn, Ce-Cr отмечаются значимые изменения в значениях коэффициентов.

Ещё более отчётлива видна разница при изучении зон сжатия и растяжения Сюльдюкарских кимберлитов (Таблица 5.2, Таблица 5.3, Рис. 5.4). Для анализа зон сжатия и растяжения были выбраны схожие пары элементов, однако есть различия в представляемых на диаграммах парах для наглядности.

Таблица 5.2 - Матрица значений коэффициентов корреляции пар элементов в секторах сжатия в околотрубочном пространстве Сюльдюкарских кимберлитов по данным РФА (94 анализа)

	Cr	V	Co	Ni	Ba	Zn	Nd
Cr	-	0.56	0.15	0.45	0.32	0.25	0.42
V	0.56	-	0.38	0.48	0.44	0.21	0.14
Co	0.15	0.38	-	0.38	0.07	0.17	0.23
Ni	0.45	0.48	0.38	-	0.29	0.14	0.25
Ba	0.32	0.44	0.07	0.29	-	0.07	0.13
Zn	0.25	0.21	0.17	0.14	0.07	-	0.29
Nd	0.42	0.14	0.23	0.25	0.13	0.29	-

Таблица 5.3 - Матрица значений коэффициентов корреляции в секторах растяжения в околотрубочном пространстве Сюльдюкарских кимберлитов по данным РФА (151 анализ)

	Cr	V	Co	Ni	Ba	Zn	Nd
Cr	-	0.51	0.64	0.62	0.49	0.43	0.51
V	0.51	-	0.55	0.42	0.55	0.35	0.43
Co	0.64	0.55	-	0.39	0.48	0.26	0.35
Ni	0.62	0.42	0.39	-	0.32	0.61	0.56
Ba	0.49	0.55	0.48	0.32	-	0.24	0.40
Zn	0.43	0.35	0.26	0.61	0.24	-	0.38
Nd	0.51	0.43	0.35	0.56	0.40	0.38	-

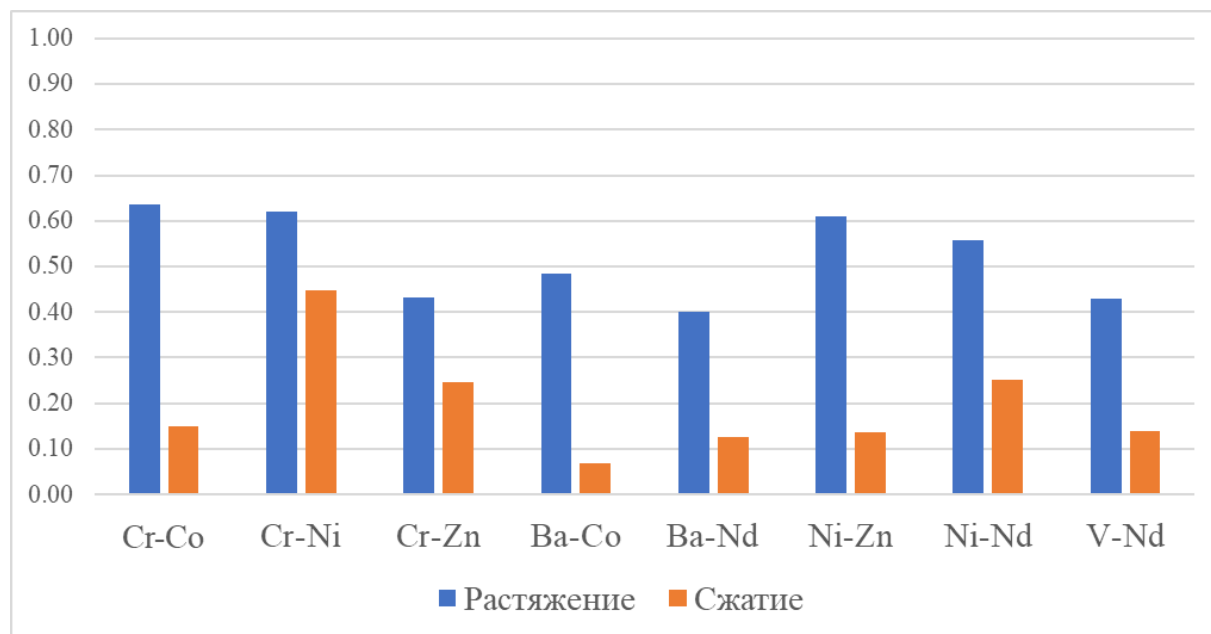


Рис. 5.4 Соотношения коэффициентов корреляции в секторах растяжения и сжатия в околотрубочном пространстве Сюльдюкарских кимберлитов по данным РФА

Высокая корреляция между элементами фоновых содержаний для осадочных пород, очевидно, обусловлена процессами выветривания, морской седиментации, диагенеза и катагенеза терригенно-карбонатных отложений. На всех стадиях литогенеза должно происходить выравнивание содержаний и установление прочных связей за счет однотипных процессов дифференциации элементов в литогенезе [38].

Для объяснения нарушения таких связей в околотрубочном пространстве надо напомнить, что по ряду представлений формирование кимберлитов происходило в результате фреатомагматических взрывов [22, 54, 60, 61]. Когда быстро поднимающаяся флюидизированная магма с температурой порядка 1000°C достигала на глубинах 1,0-1,5 км кембрийских рассолов, температура которых в позднем девоне вряд ли намного превышала 100°C . С происходил взрыв. В этих условиях при взрывах должен был формироваться сложный газовый флюид, часть которого захватывала вмещающую кимберлиты геологическую среду.

Очевидно, что в блоках сжатия газы существенно импрегнировали породы, а в блоках растяжения – диссипировали в атмосферу. Ореолы импрегнированного высокотемпературного CO_2 установлены в околотрубочном пространстве на участках Майского месторождения и Озерного рудопроявления алмазов в Накынском поле Якутии [25, 55]. Помимо CO_2 во флюиде должны были быть CH_4 , соединения хлора, S и H_2S . Вероятно, они могли экстрагировать элементы и в разной степени их переносить, что и предопределило нарушение корреляции между ними в околотрубочном пространстве. При этом возможно образование микроминералов, которые установлены в околотрубочном пространстве кимберлитов Архангельской субпровинции [46, 64]. Следствием действия высокотемпературных флюидов и большого взрывного давления, вполне вероятно, происходили реакции газовых соединений хлора и водорода с рассматриваемыми металлами, многие из которых были в рассеянной не минеральной форме. Можно предположить, что хлориды и, возможно, гидриды тяжелых тугоплавких металлов, в частности, Cr, должны были иметь короткий путь в породе. Напротив, хлориды и гидриды относительно легкого и менее тугоплавкого Ni и, тем более, металлоида V продвигались далее в твердой фазе горной породы.

При этом в условиях тектонического сжатия они должны были накапливаться, а в условиях растяжения все газы должны были уходить из околотрубочного пространства. Так как формирование кимберлитов сопровождалось взрывами, которые получались за счет взаимодействия захороненных кембрийских рассолов с быстро поднимающейся градусной флюидизированной ультраосновной магмой. Состав древних формационных вод был сульфатно-хлоридный, поскольку такие рассолы регионально распространены в Западной Якутии [9, 11].

В этих условиях в моменты взрывов горячий восстановительный водно-хлоридный флюид мог растворять металлы и их перераспределять на небольшое расстояние, поскольку он быстро

остывал и окислялся. При этом следует учитывать, что подвижность компонентов флюида разных свойств металлов была различной. Условия тектонического стресса и сжатия были благоприятны задержке флюида и служили своего рода экраном. В условиях локального растяжения проницаемость была высокой и геохимической дифференциации не было при диссипации флюида.

Для проверки изложенной гипотезы доктором химических наук, профессором ИГЕМ РАН, Николаем Николаевичем Акинфиевым в рамках совместного гранта РНФ №23-27-00280 «Условия образования промышленных концентраций скандия в древних корах выветривания Западной Якутии» выполнены термодинамические расчеты взаимодействия модельного флюида с ассоциацией минералов (Таблица 5.4).

Таблица 5.4 - Принятый модельный минеральный состав породы и взаимодействующего с ней водного флюида

Минерал/компонент	Количество	Единицы
гематит Fe_2O_3		pmc
магнетит Fe_3O_4		pmc
миллерит NiS	1.00	mol
катьерит CoS_2	1.00	mol
пирит FeS_2	3.00	mol
циркон ZrSiO_4	1.00	mol
барит BaSO_4	1.00	mol
целестин SrSO_4	1.00	mol
сфалерит ZnS	1.00	mol
кварц SiO_2	5.00	mol
Sc_2O_3	1.00	mol
H_2O	1.00	kg
NaCl	1.00	mol
H_2S	0.05	mol
HCl	var	mol
NaOH	var	mol

Примечание: гематит и магнетит приняты как вполне подвижные компоненты (pmc), обеспечивающие окислительно-восстановительный потенциал системы. Концентрации HCl и NaOH варьировались в некоторых пределах (var), обеспечивающих pH флюида, близкий к нейтральному.

Моделирование проводилось с помощью программного комплекса HCh [62, 63]. Результаты расчёта представлены на рис. 27 и соответствуют предельным концентрациям элементов во флюиде в диапазоне температур 100 – 600 °C и некотором модельном давлении 2

кбар (Рис. 5.5). Состав флюида при каждой температуре подбирался так, чтобы обеспечить его примерную нейтральность при достижении равновесия.

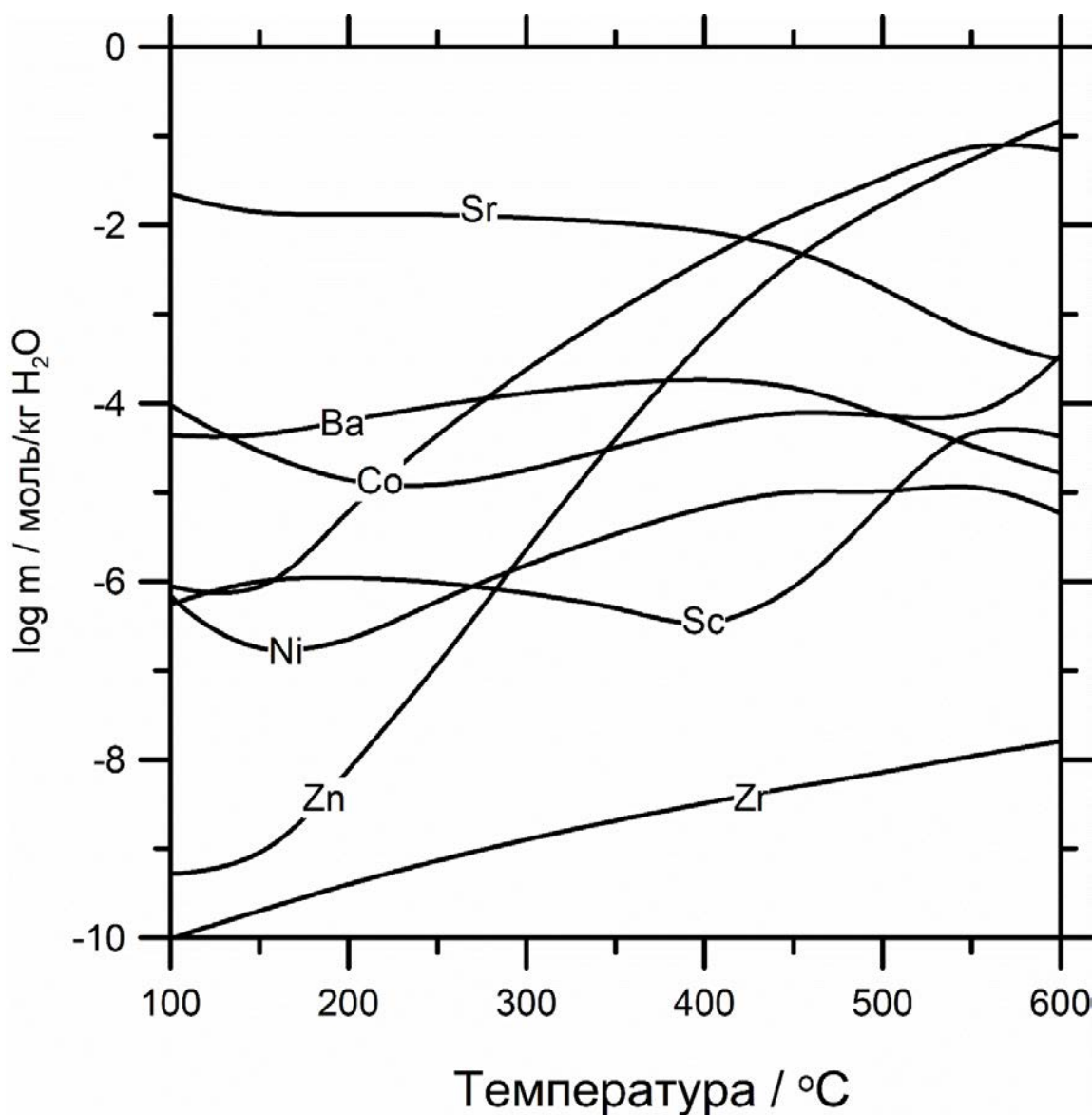


Рис. 5.5 Предельные концентрации элементов в водно-хлоридном флюиде в диапазоне температур 600 – 100 0С и модельном давлении 2 кбар по результатам расчёта взаимодействия модельного флюида с ассоциацией минералов [15].

По аналогии с Сюльдюкарским телом был проанализирован и участок Майского кимберлита Накынского поля. Майское месторождение алмазов расположено в Накынском поле Средне-Мархинского района южной части Западно-Якутской алмазоносной провинции [48]. Вместе с ним в центральной части поля имеются Нюрбинское и Ботуобинское месторождения трубчатого типа, которые находятся в отработке. В отличие от них, Майские кимберлиты слагают дайкообразное тело. Все кимберлиты прорывают терригенно-карбонатные осадочные породы нижнего палеозоя, включая олдондинскую свиту ордовика, и перекрыты юрскими тонкообломочными сероцветными отложениями и незначительным чехлом четвертичных образований.

Центральная часть Накынского поля до глубин 100-120 м хорошо изучена бурением с полным выходом керна, на ряде локальных участков сеть бурения составляет 100х100 м. На месторождениях пройдены многочисленные наклонные разведочные скважины по сети 20х40 м. В Накынском поле, в том числе и на Майском месторождении изучен керн большинства поисковых и разведочных скважин по оригинальной методике, когда фиксируются признаки тектонических условий сжатия и растяжения, флюидоразрывов и гидротермальная минерализация [21]. Это позволило закартировать рудовмещающий сдвиг, расположенный в узле пересечения других разломов также сдвигового типа. Обоснована цветочная тектоно-динамическая модель месторождения с симметричными секторами сжатия и растяжения, которым подчиняются раздувы и пережим кимберлитовой дайки (Рис. 5.6).

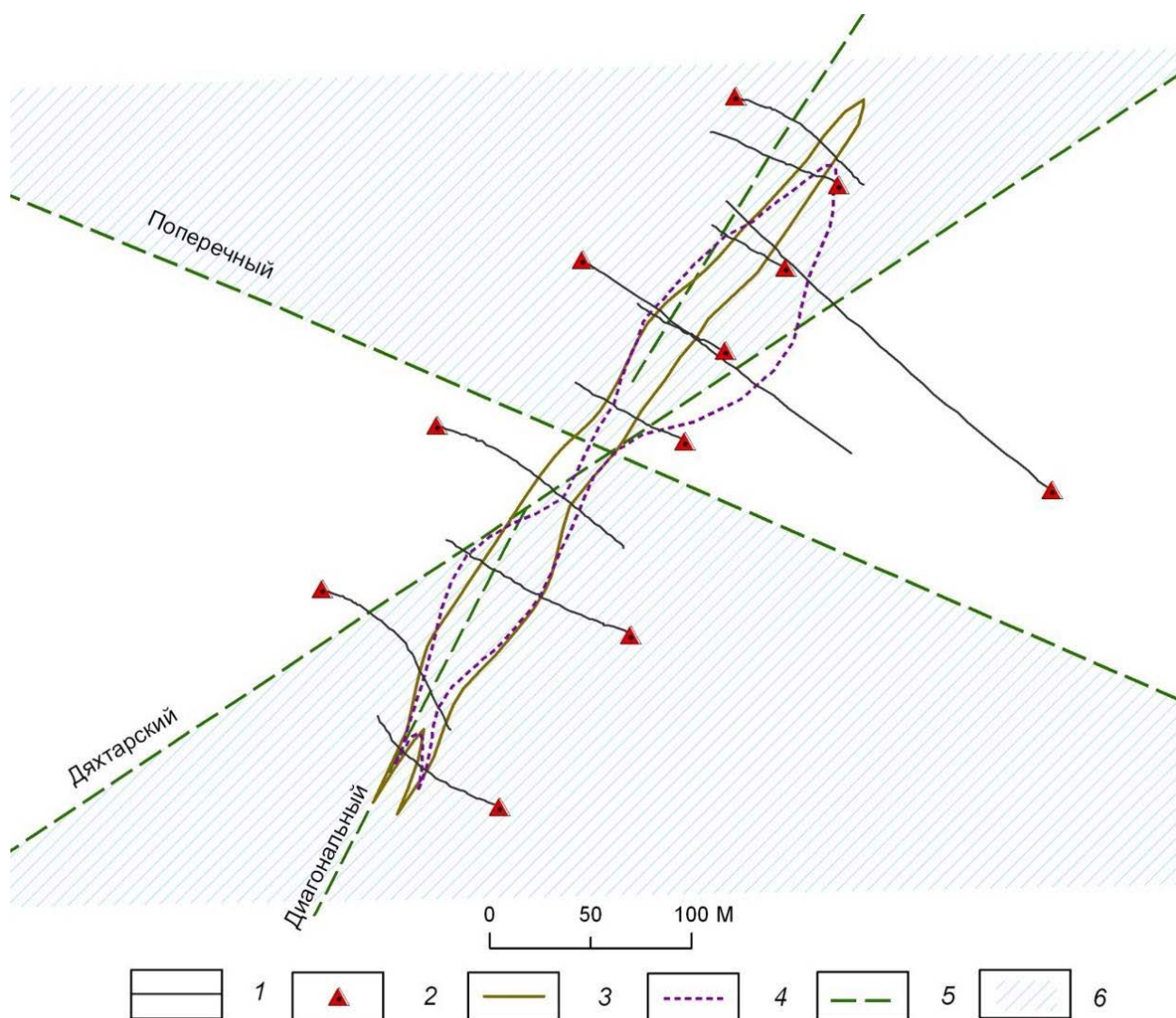


Рис. 5.6 Структурная модель локализации кимберлитов участка Майского месторождения алмазов при крутом падении разломов

1 – горизонтальное проложение стволов скважин; 2 – устья скважин; сечения кимберлита на глубинах: 3 – 80 м и 4 – 280 м; 5 – проекции основных швов Дяхтарского, Поперечного и Диагонального разломов; 6 – сектора растяжения [23].

Для анализа выбраны следующие элементы: Cr, Ni, Co, V, Sc, Zn, Ba, Sr и Zr. Из них Cr, Ni и Co являются типоморфными элементами кимберлитов [33], V, Sc и Zn типичны для базитов, а Ba, Sr и Zr характерны для карбонатитов, сопровождающих кимберлитовый магматизм [37, 52]. Их средние высокие концентрации отмечены и в кимберлитах Якутии [33], которые считают кимберлит-карбонатитами [40]. Помимо этого, V и Ni могут дополнительно указывать на разгрузку углеводородов нефтяного ряда [56] в местах кимберлитовых тел. Для расчета средних содержаний элементов по центральной части Накынского поля использован 71 анализ из проб, взятых из серии скважин, вскрывших ордовикские породы. Среднее взято как среднеарифметическое. Также были рассчитаны средние значения для околотрубного пространства по 74 пробам, отобранным из разведочных скважин. При этом из выборок предварительно удалялись редкие ураганные содержания, отличавшиеся от медианных значений на порядок и больше. Такие пробы, очевидно, содержали прожилковую или вкрапленную сульфидную или сульфатную минерализацию, например сфалерита или барита. Полученные средние значения фона в околосимберлитовом пространстве и в осадочных породах ордовика практически совпадают и в целом соответствуют их кларкам (Таблица 5.5).

Таблица 5.5 - Средние содержания элементов (в г/т) в олдондинской свите ордовика фона в центральной части Накынского поля и в околотрубном пространстве Майского месторождения алмазов

	Cr	V	Co	Ni	Sr	Ba	Zn	Zr
Фон (71 анализ)	47.7	50.1	5.3	26.4	114.9	149.6	40.3	53.3
Вблизи кимберлита (74 анализа)	49.9	44.6	5.6	31.9	185.7	152.4	40.8	68.7
Кларки для карбонатных пород	11	19	1	20	370	50	20	20
Кларки для глини	90	150	19	70	260	550	95	200

Примечание. Средние содержания химических элементов в главных типах горных пород, почвах и земной коре. Кларки указаны на основании таблицы, составленной в отделе «Геоэкологии и геохимического картирования» ИМГРЭ [68]

Интересными оказались результаты расчета парных коэффициентов корреляции отмеченных элементов в породах олдондинской свиты в геохимическом фоне и вблизи кимберлитов (Таблица 5.6, Рис. 5.7). Для этого использованы выборки по 115 анализам по фону и 61 анализу из пород, вмещающих кимберлиты.

Таблица 5.6 - Коэффициенты корреляции элементов в породах олдондинской свиты геохимического фона центральной части Накынского поля и вблизи кимберлитов Майского месторождения алмазов

	Cr-Co	Cr-Ni	Cr-Zn	V-Cr	V-Zn	V-Co	Ni-Zn	Ni-Co	Co-Zr	Ba-Zn
Фон	0.75	0.81	0.74	0.88	0.76	0.77	0.78	0.72	0.73	0.71
Вблизи кимберлита	0.57	0.65	0.06	0.69	0.04	0.59	0.23	0.68	0.47	0.09

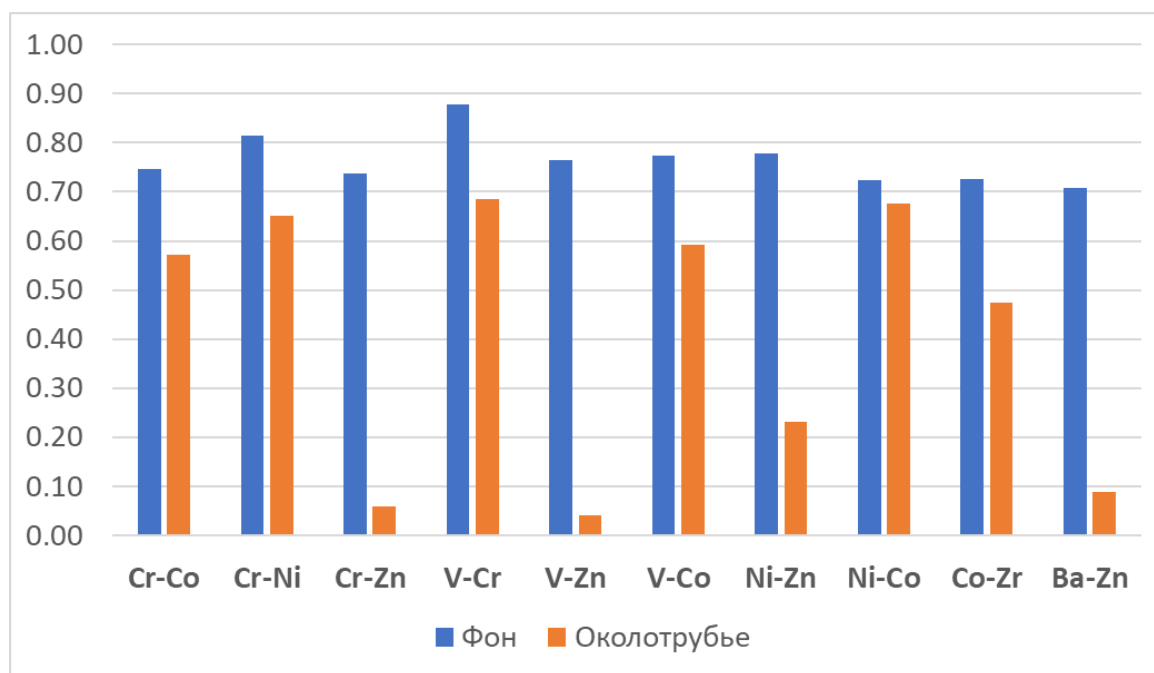


Рис. 5.7 Диаграммы соотношения коэффициентов корреляции элементов в породах олдондинской свиты геохимического фона центральной части Накынского поля и вблизи кимберлитов Майского месторождения алмазов.

Во-первых, необходимо подчеркнуть высокую положительную связь отмеченных пар для геохимического фона осадочных терригенно-карбонатных пород: коэффициенты корреляции колеблются от 0,71 до 0,88. Во-вторых, для всех пар элементов имеет место снижение корреляции при переходе от фона к околотрубочному пространству. Особенно это очевидно для корреляций Zn с Cr, V и Ni. Также значительное снижение связи получилось между кобальтом и цирконием. В-третьих, надо отметить небольшие нарушения положительных связей между однотипными элементами-индикаторами кимберлитов (Cr, Co и Ni) и базитофильным V. На участке Майского месторождения установленные локальные сектора растяжения и сжатия, вероятно, существовали во время внедрения кимберлитов [24]. В этой связи стало возможным дифференцировать околосекулярное пространство по этим секторам. Для этого рассчитаны коэффициенты корреляции отмеченных элементов в секторах растяжения по 51 и сжатия по 92 пробам. (Таблица 5.7, Рис. 5.8).

Таблица 5.7 - Коэффициенты корреляции элементов в породах олдондинской свиты в зонах сжатия и растяжения Майского месторождения алмазов

	Cr-Co	Cr-Ni	Cr-Zn	V-Cr	V-Zn	V-Co	Ni-Zn	Ni-Co	Co-Zr	Ba-Zn
Растяжение	0.73	0.81	0.70	0.76	0.64	0.82	0.76	0.86	-0.03	-0.05
Сжатие	0.65	0.74	0.08	0.81	0.06	0.69	0.20	0.67	0.19	0.02

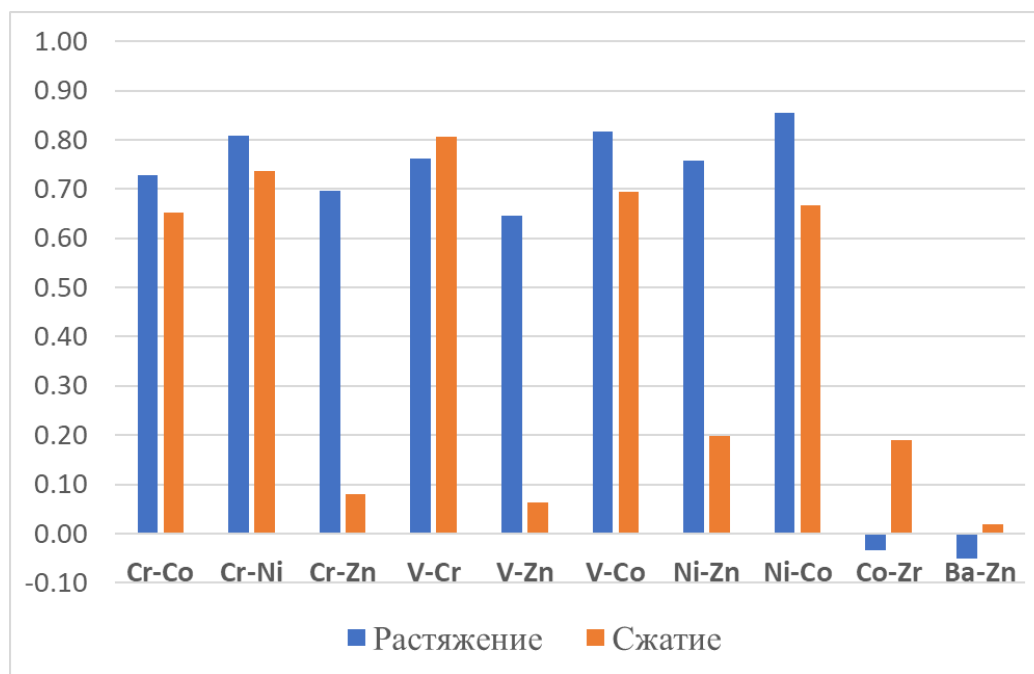


Рис. 5.8 Коэффициенты корреляции элементов в породах олдондинской свиты в секторах растяжения и сжатия вблизи кимберлитов Майского месторождения.

В секторах растяжения установлены высокие положительные связи Cr-Co, Cr-Ni, Cr-Zn, V-Cr, V-Zn, V-Co, Ni-Zn и Ni-Co и практическое отсутствие таковых для Co-Zr и Ba-Zn. В секторах сжатия по большинству пар снижается корреляция, за исключением V-Cr, для которой она растет. При этом для Cr-Zn, V-Zn и Ni-Zn связи снижаются весьма существенно. Сравнивая данные по фону и вблизи кимберлитов с цифрами по тектоническим условиям, надо отметить сходство фоновых значений с секторами растяжения.

Сохранение средних субкларковых содержаний во вмещающих кимберлиты осадочных породах ордовика представляется естественным и отражает фоновые геологические процессы.

Высокая положительная корреляция для рассмотренных пар элементов в неизмененных осадочных породах ордовика в геохимическом фоне согласуется с выравниванием геохимических связей в процессах распределения элементов в литогенезе: формирования сначала кор выветривания, затем седиментации, диагенеза и катагенеза [38]. Нарушение корреляции элементов для таких же пород из ближнего к кимберлитам пространства при сохранении средних фоновых содержаний является парадоксальным. Так же, как и похожий тренд для зон локального сжатия в рудовмещающих структурах на участке кимберлитов.

Предлагаемая методика была дополнительно апробирована на участке поисковой площади Бестях Мало-Ботуобинского района. На данный момент там не обнаружено кимберлитов, однако минералогические, тектонические и другие признаки указывают на его вероятное нахождение. На основе картирования признаков кимберлитовмещающих структур во вмещающих породах холмолохской свиты выделены наиболее перспективные на обнаружение кимберлитов участки (Рис. 5.9).

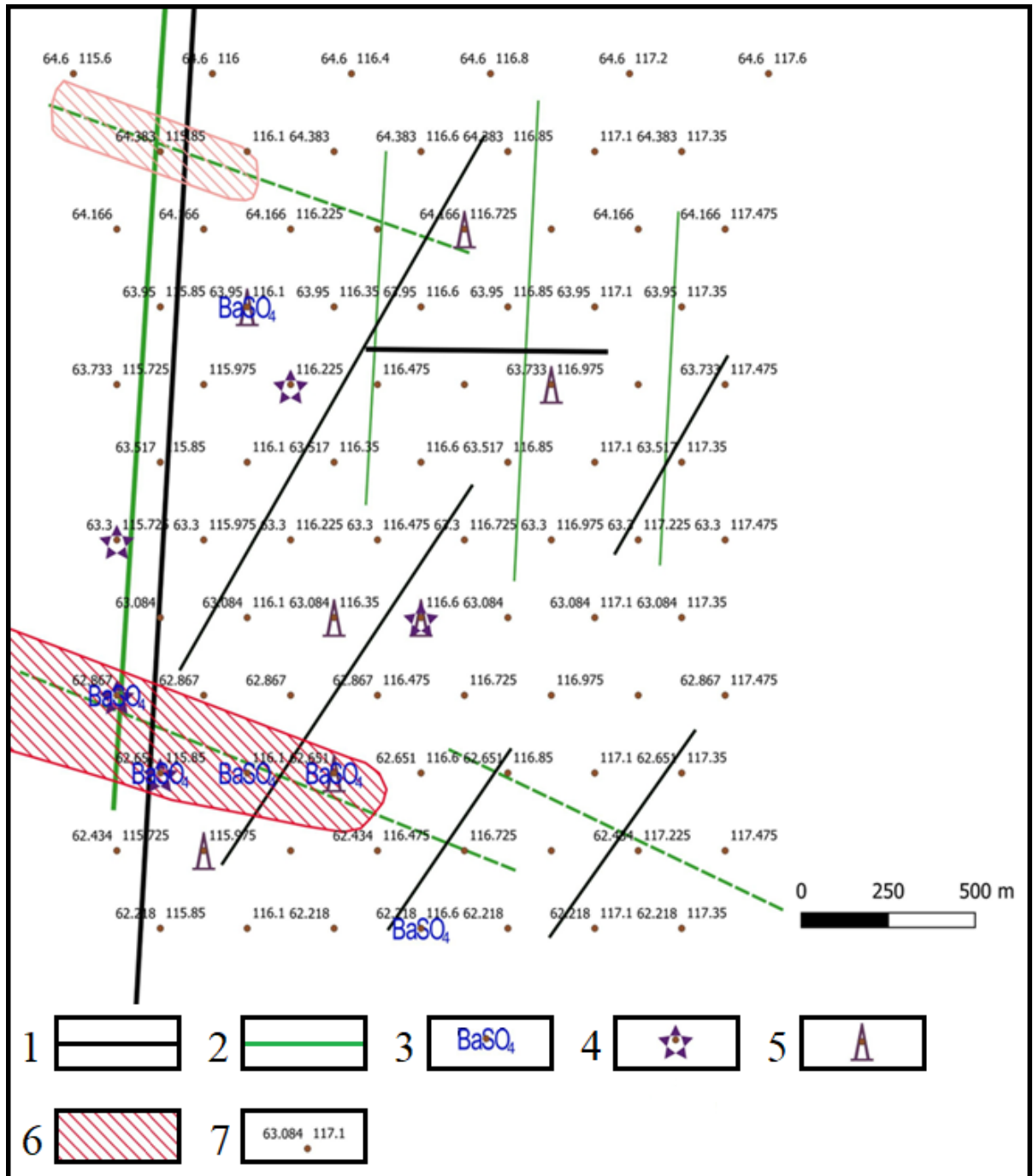


Рис. 5.9 Прогнозная схема на обнаружение кимберлитов центральной части поисковой площади Бестях. 1 – разнонаправленные разломы сбросового типа; 2 – разнонаправленные разломы сдвигового типа; 3 – баритовая минерализация; 4 – карбонатная брекчия; 5 – флюидоразрывная брекчия; 6 – перспективные площади; 7 – скважина.

Для анализа и составления выборки, выбран только южный участок в связи с лучшей представительностью данных опробования.

Наибольшей сложностью стала сходимость результатов ICP и РФА анализов. На участке Бестях линии с 62.218 и по 63.3 анализировались с помощью РФА анализа. Все остальные были выполнены с помощью ICP в связи с технической неисправностью РФА-анализатора S8 TIGER "BRUKER". Для решения вопроса был отобран ряд проб, которые в дальнейшем были проанализированы с помощью обеих методик. Разница в результатах анализов по макроэлементам составила порядка 0.1%. Чуть хуже ситуация с микроэлементами, для которых в некоторых случаях разница была уже критичной и на малых содержаниях давала разницу в 2 раза, в том числе и скандий. Для скандия такая проблема характерна только с низкими содержаниями (ниже 5 г/т), этот элемент в данном случае был исключен из анализа.

Данные, полученные по представительной выборке со сходимыми анализами представлены в таблице 5.8 и рисунке 5.10.

Таблица 5.8 - Коэффициенты корреляции элементов в холомолохской свите фоновой части площади Бестях и перспективного участка

	Cr-Co	Cr-Ni	Cr-Zn	V-Cr	V-Zn	V-Co	Ni-Zn	Ni-Co	Co-Zr
Фон	0.37	0.44	0.53	0.49	0.83	0.74	0.67	0.68	0.58
Перспектива	0.06	0.05	-0.11	0.08	0.70	0.32	0.63	0.54	0.29

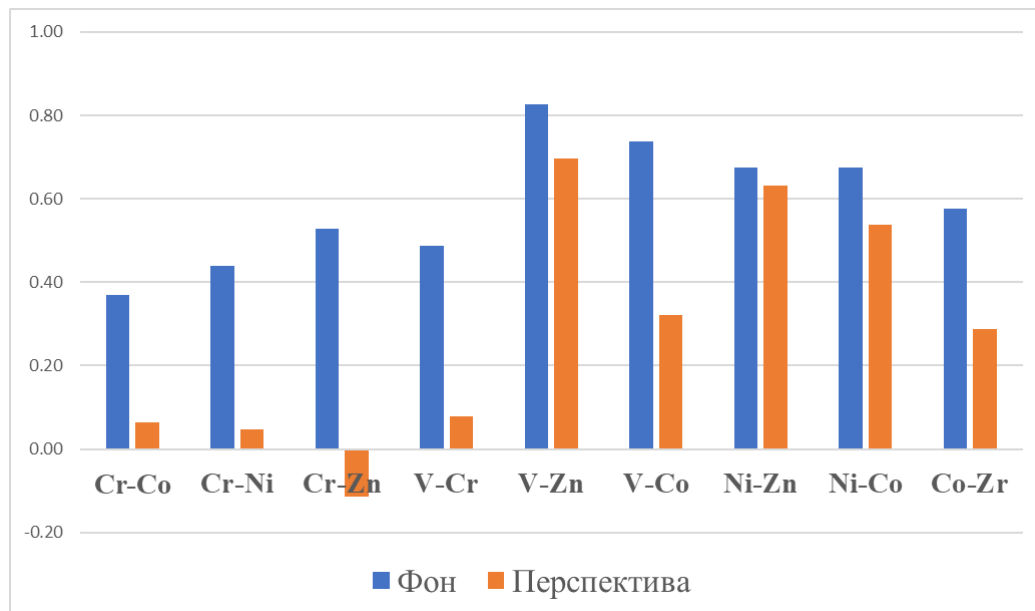


Рис. 5.10 Диаграммы соотношения коэффициентов корреляции элементов в породах холомолохской свиты фоновой части площади Бестях и перспективного участка.

Видно, что для всех пар элементов кроме Ni-Zn и в меньшей степени V-Zn, Ni-Co, наблюдаются значительные уменьшения коэффициентов корреляции. По аналогии с участками Майского месторождения и Сьюльдюкарского тела это подтверждает перспективность данного участка на нахождение кимберлита.

Глава 6 Практические рекомендации

В диссертации подведена научная база для выявления комплексных скандий-редкоземельных месторождений в имеющихся алмазоносных районах ЯАП, а также предложена методика для обнаружения кимберлитов в уже опойскованных районах с густой сетью бурения.

Оценка прогнозных ресурсов скандия

Имеющиеся данные по содержаниям скандия дают возможность провести расчёты прогнозных ресурсов скандия по категории P_2 для коры выветривания по Сюльдюкарскому кимберлиту и площади на западном фланге Накынского поля.

Для Сюльдюкарского кимберлитового поля интересна только кора выветривания по кимберлиту: Среднее содержание скандия (Sc) в предполагаемом рудном горизонте принято за 100 г/т, длина продуктивной зоны (L) составляет по данным бурения 250 м, ширина зоны (W) – 50 м, средняя мощность продуктивного слоя (H) ограничена 2 м, плотность предполагаемой руды (ρ) взята как плотность глинистых кор выветривания по базитам и составляет 2,1 т/м³.

Объём продуктивной зоны (м):

$$V = L * W * H = 250 \text{ м} * 50 \text{ м} * 2 \text{ м} = 25\,000 \text{ м}^3.$$

Масса руды (М):

$$M = V * \rho = 25\,000 \text{ м}^3 * 2,1 \text{ т/м}^3 = 52\,500 \text{ тонн}.$$

Содержание скандия в руде (C):

$$C = 100 \text{ г/т} = 0,0001 \text{ (доли единицы)}$$

Прогнозные ресурсы скандия (Q):

$$Q = M * C = 52\,500 \text{ т} * 0,0001 = 5,25 \text{ тонн Sc}$$

Такие ресурсы, к сожалению, не так интересны, так как на этапах поисков, оценки, разведки и предполагаемых эксплуатационных работ, затраты, могут оказаться выше, чем стоимость имеющихся ресурсов.

Для западного перспективного участка Накынского поля мы имеем следующие вводные данные: среднее содержание скандия (Sc) в «руде»: 150 г/т, длина продуктивной зоны (L): 3 км = 3000 м, ширина зоны: 500 м (W), условно принятая мощность «продуктивного слоя»: 5 м (H), Плотность «руды» (взята плотность глинистых кор выветривания по базитам – ρ): 2,1 т/м³.

Объём продуктивной зоны (V):

$$V = L * W * H = 3\,000 \text{ м} * 500 \text{ м} * 5 \text{ м} = 7\,500\,000 \text{ м}^3.$$

Масса «руды» (M):

$$M = V * \rho = 7\,500\,000 \text{ м}^3 * 2,1 \text{ т/м}^3 = 15\,750\,000 \text{ тонн}$$

Содержание скандия в «руде» (C):

$$C = 150 \text{ г/т} = 0,00015 \text{ (доли единицы)}.$$

Ресурсы скандия (Q):

$$Q = M * C = 15\,750\,000 \text{ т} * 0,00015 = 2\,362,5 \text{ тонн Sc}$$

На основании этих оценок реально перспективной можно считать только западную часть Накынского поля.

Расчёт стоимости прогнозных ресурсов на данном этапе производить некорректно, так как не ясна точная минеральная форма скандия. В работе данные по содержанию Sc всегда приводились в чистой металлической форме, однако при добыче извлечь чистый металл не выйдет. Стоимость разных форм скандия разная. По данным шанхайского рынка металлов [69] стоимость Sc_2O_3 составляет 845.74\$, в то время как стоимость чистого Sc составляет 4,228.72\$ на 23 марта 2025 года.

В целом в качестве практических рекомендаций следует выделить два основных момента: заверка аномалии на комплексные скандий-редкоземельные месторождения и анализ имеющихся данных геохимического опробования керна для обнаружения кимберлитовых тел.

На площади выделенной перспективной геохимической аномалии на скандий на выделенном участке 3000 на 500 м в Накынском поле (Рис. 3.7, Рис. 3.8) работы рекомендуется провести в два этапа: на первом из них провести на трех участках с геохимическими аномалиями скандия бурение ограниченного числа неглубоких скважин кустами (Рис. 6.1) со специализированным опробованием на скандий дяхтарской свиты и триасовой коры выветривания. И выполнить анализы в сертифицированной лаборатории. На втором этапе следует осуществить бурение по заданной на основании предыдущего этапа сети с литогеохимическим опробованием керна.

Предлагается проанализировать все имеющиеся поисковые площади, в которых пробурены скважины по поисковой сети 400х400 и меньше, а также в которых имеются данные литогеохимического опробования керна. Если площадь соответствует этим требованиям, а информации об опробовании достаточно для составления 2 выборок (фон и перспектива), данную площадь целесообразно проверить с использованием новой методики.

Эта предлагаемая работа не несёт в себе значительных дополнительных финансовых расходов и заключается исключительно в обработке уже имеющихся данных.

Безусловно при выборе перспективных участков необходимо использовать имеющиеся данные о минералогических и геофизических аномалиях.

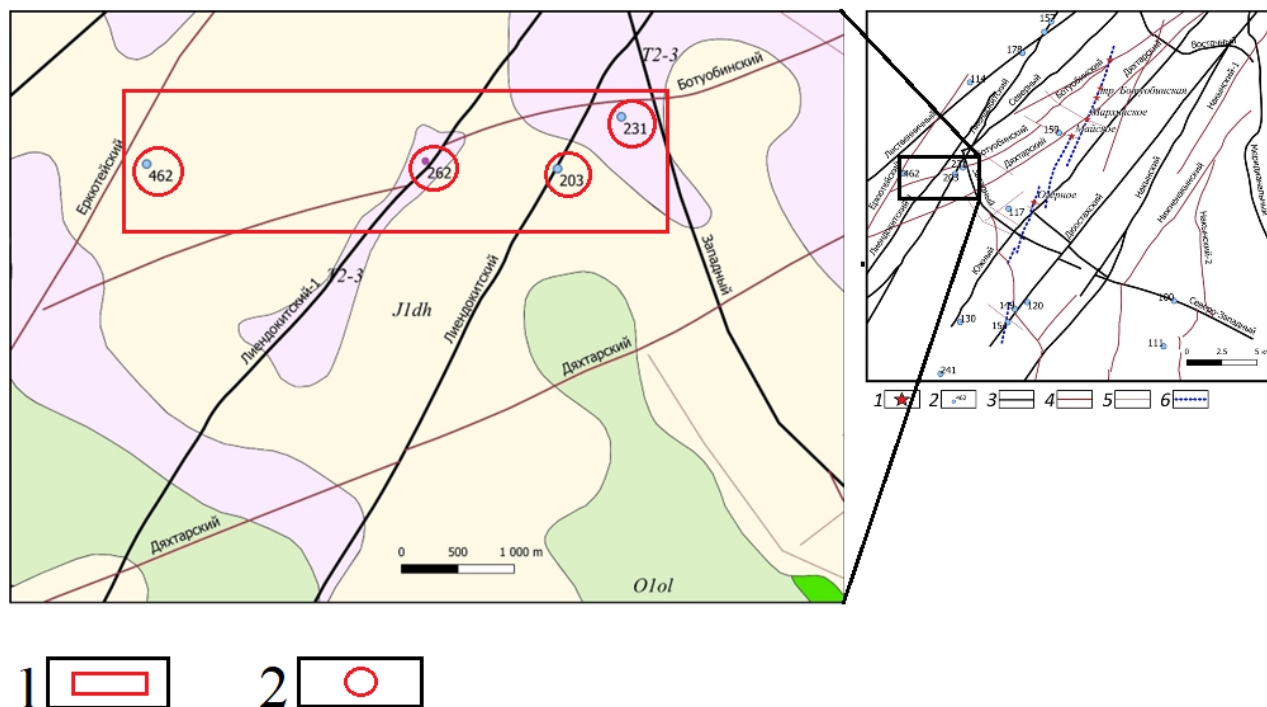


Рис. 6.1 Предполагаемые перспективные участки для обнаружения комплексных скандий-редкоземельных месторождений

1 – участок для проведения поискового бурения по сети, 2 – участки для кустового бурения для заверки аномалий.

Заключение

Основная цель работы «выявление геологических и физико-химических условий образования, а также локализация вероятных промышленных концентраций скандия в алмазоносных районах Западной Якутии» выполнена. Выявлена наиболее перспективная геологическая формация для образования промышленных концентраций скандия – это дяхтарская свита нижней юры, представленной смещенными и повторно литифицированными продуктами кор выветривания по базитам, ультрабазитам и карбонатно-терригенным породам олдондинской свиты нижнего ордовика на территории Накынского поля. Вероятные промышленные концентрации Sc локализованы в западной части Накынского поля на участке 500м в ширину и 3 км в длину. Промышленные, но слабо рентабельные концентрации отмечены в коре выветривания по Сюльдюкарскому кимберлиту.

В ходе исследования были выполнены следующие задачи:

1) Проведён анализ истории формирования и скандиеносности древних кор выветривания Западно-Якутской алмазоносной провинции (ЗЯАП). По данным предшественников, прежде всего по данным Н.Н. Зинчука [13] показано, что коры выветривания распространены на древних палеоподнятиях, которые соответствуют кимберлитовым районам, в том числе, районам перекрытых чехлом карбон-пермских угленосных отложений, вулканогенных образований триаса и юрскими морскими отложениями. Коры выветривания триас-юрского возраста перекрыты и захоронены тонкообломочными мелководно-морскими отложениями нижней юры. Для Накынского поля Средне-Мархинского района широко распространены отложения переотложенных кор выветривания в виде деллювиальных, пролювиальных, озерно-карстовых и инфлювиальных отложений. Состав и условия образования описаны в кандидатских диссертациях И.И. Никулина, О.С. Граханова, О.К. Килижекова, защищенных в 2000-е года. Эти коры развиты в том числе по магматическим телам, в которых по данным Киселёва [27] отмечены повышенные концентрации скандия.

2) Изучен состав и особенности строения кор выветривания, распространённых в Средне-Мархинском, Ыгыаттинском и Мало-Ботуобинском алмазоносных районах, установлены геологические предпосылки накопления скандия в древних корах выветривания Накынского и Сюльдюкарского кимберлитовых полей Западно-Якутской алмазоносной провинции, выделены геологические формации, которые могли служить источником скандия на этапе формирования зон внутрипластового окисления в триасовую эпоху в Западной Якутии. Обоснованы основные этапы латеритизации и формирования кор выветривания. Допозднепалеозойский и дораннеюрский этапы формирования кор выветривания на долеритах характерны для всех

описываемых районов. Концентрации скандия локализованы в глинах поздний триас-раннеюрской дяхтарской свиты, представленных материалом переотложенных кор выветривания. Они залегают на глубинах до 90 м и перекрыты терригенными отложениями юрского возраста.

3) Выделены специализированные на скандий формации Западной Якутии – силлы и дайки основного состава среднепалеозойских траппов, туфы основного состава и силлы триасовых траппов и материал развитых по ним древних кор выветривания позднедевонско-раннекаменноугольного и средне-позднетриасового возраста. Для Ыггыатинского района наиболее перспективной является кора выветривания по Сюльдюкарскому кимберлиту.

4) В верхнепалеозойских толщах Западной Якутии в областях поднятий установлены проявления древнего пластового и трещинно-пластового окисления. Последнее затрагивает каменноугольные перекрытые коры выветривания. Предположение о рудообразующих процессах в связи с древним инфильтрационным эпигенезом, в том числе наложенных на материал древних кор выветривания, реализовано на примере повышенных концентраций скандия. Хотя промышленных концентраций скандия в зонах древнего пластового окисления не обнаружено, на примере разрезов и точечных ИСР анализов пород с поисковой площади Бестях доказано, что ЗПО участвовали в переносе скандия.

5) В западной части Накынского кимберлитового поля локализован наиболее перспективный участок, площадью 1.5 км². Промышленные концентрации скандия в нём имеют максимальное значение в 462 г/т и среднее в 150 г/т и отмечены как по горизонтали, так и по вертикали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блажкун Д.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Верхневилуйская (новая серия). Лист Р-50-I. Объяснительная записка. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. – 120 с.
2. Борисенко Л.Ф. Скандий в минералах гипербазитов Тагило-Баранчинского массива (Урал) // Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана. Труды. – 1965. – Вып. 16. – С. 45–56.
3. Борисенко Л.Ф., Поликашина Н.С. Методические рекомендации по перспективной оценке различных типов скандийсодержащего сырья. – М.: ИМГРЭ, 1991. – 92 с.
4. Бушков К.Ю. Структура Накынского кимберлитового поля и признаки скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Москва: МГРИ-РГГРУ, 2006. – 24 с.
5. Быховский Л.З., Потанин С.Ж., Котельников Е.И. и др. Редкоземельное и скандиевое сырье России // Минеральное сырье. – 2018. – № 31. – С. 216.
6. Викентьев И.В., Кайлачаков П.Э. Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона Русской плиты. Сообщение 1. Геологическое строение // Литология и полезные ископаемые. – 2020. – № 3. – С. 209–226.
7. Граханов О.С. Строение, состав и условия формирования раннемезозойских погребенных россыпей алмазов Средне-Мархинского района Западной Якутии: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Воронеж, 2010. – 22 с.
8. Граханов С.А., Шаталов В.И., Штыров В.А., Кычкин В.Р., Сулейманов А.М. Россыпи алмазов России. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 437 с.
9. Дзюба А.А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 1984. – 156 с.
10. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / под ред. И.Н. Солодова. – М.: ZetaPrint, 2022. – 183 с.
11. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. – 507 с.
12. Еременко Р.У., Игнатов П.А., Илларионов П.Н. Петрохимические характеристики древних кор выветривания с концентрациями скандия Накынского кимберлитового поля // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2024. – Т. 66, № 3. – С. 78–87.
13. Зинчук Н.Н. Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1994. – 240 с.

14. Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М., Стегницкий Ю.Б. Сравнительная минералогическая характеристика кор выветривания кимберлитовых пород трубок Нюрбинская и Ботуобинская // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов: материалы науч.-практ. конф., посв. 30-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Мирный, 1998. – С. 132–134.
15. Игнатов П.А., Еременко Р.У., Акинфиев Н.Н. и др. Нарушение корреляционных связей Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, Zn, V и Sc в осадочных породах ордовика, вмещающих кимберлиты Майского месторождения алмазов Якутии // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2022. – № 3. – С. 45–52.
16. Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазодонной провинции // Горный журнал. – 2022. – № 7. – С. 12–21.
17. Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Пластовое и пластово-трещинное окисление в карбоново-пермских отложениях и древней коре выветривания Западной Якутии и связанные с ним рудопоявления скандия // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 187–201.
18. Игнатов П.А., Зарипов Н.Р., Ковальчук О.Е. Индикаторные свойства прожилкового осветления красноцветных отложений при прогнозировании и поисках кимберлитов: методическое пособие. – Мирный: АЛРОСА, 2022. – 155 с.
19. 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.
20. Игнатов П.А., Колесник А.Ю., Толстов А.В., Мальцев М.В. Геологические признаки рудовмещающих структур Сюльдюкарского кимберлитового поля Якутии // Горный журнал. – 2019. – № 10. – С. 67–71.
21. Игнатов П.А., Новиков К.В. Полевая диагностика тектонических нарушений и флюидоразрывных образований в кимберлитовмещающих отложениях нижнего палеозоя: методическое руководство. – Мирный, 2019. – 76 с.
22. Игнатов П.А., Новиков К.В., Зарипов Н.Р., Ходня М.С., Бурмистров А.А., Лисковая Л.В., Килижеков О.К. Эруптивные флюидоразрывные образования Накынского алмазодонного поля Якутии // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2018. – № 6. – С. 37–44.
23. Игнатов П.А., Новиков К.В., Шмонов А.М. и др. Зональность тектонических нарушений и вторичной минерализации в околосимберлитовом пространстве Майского

месторождения алмазов Накынского поля Якутии // Геология рудных месторождений. – 2018. – Т. 60, № 3. – С. 45–52.

24. Игнатов П.А., Шмонов А.М., Новиков К.В. и др. Сравнительный анализ рудовмещающих структур Майского, Мархинского и Озерного кимберлитовых тел Накынского поля Якутии // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 2. – С. 125–131.

25. Игнатов П.А., Шмонов А.М., Новиков К.В., Кряжев С.Г., Ковальчук О.Е., Разумов А.Н. Ореолы углекислого газа в карбонатных породах, вмещающих дайково-жильные кимберлитовые тела Накынского поля Якутии // Руды и металлы. – 2014. – № 3. – С. 39–46.

26. Кетрис М.П., Юдович Я.Э. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 648 с.

27. Киселев А.И., Егоров К.Н., Чернышов Р.А., Чашухин А.В., Яныгин Ю.Т. Проявления флюидно-взрывной дезинтеграции базитов в Накынском кимберлитовом поле (Якутская алмазоносная провинция) // Тихоокеанская геология. – 2004. – Т. 23, № 1. – С. 97–104.

28. Киселев А.И., Ярмолук В.В., Егоров К.Н. и др. Среднепалеозойский базитовый магматизм северо-западной части Вилюйского рифта: состав, источники, геодинамика // Петрология. – 2006. – Т. 14, № 6. – С. 626–648.

29. Ключарев Д.С. Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы. Рений / ред. Л.В. Спорыхина. – М.: ВИМС, 2016. – 39 с.

30. Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелюстов Г.Н., Кузьмин В.И., Складнева В.М., Дубинчук В.Т., Коноплева Е.В., Сидоренко Г.А. Особенности локализации редкометального оруденения на месторождении Томтор // Редкометально-урановое рудообразование в осадочных породах: сб. науч. тр. – М., 1995. – С. 223–241.

31. Коробков И.Г. Тектоника, палеогеография и базитовый магматизм алмазоносных районов восточного борта Тунгусской синеклизы. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2015. – 353 с.

32. Коробков И.Г., Евстратов А.А., Коробкова А.И. Структурно-тектоническое строение Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология. География. – 2010. – № 4. – С. 47–57.

33. Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. – Мирный, 2015. – 475 с.

34. Кравченко С.М., Беляков А.Ю., Кубышев А.И., Толстов А.В. Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды – новый тип редкометального сырья // Геология рудных месторождений. – 1990. – Т. 32, № 1. – С. 105–109.

35. Лапин А.В. Геологическая позиция и генезис богатых комплексных редкометальных руд месторождения Томтор // Геология рудных месторождений. – 1995. – Т. 37, № 1. – С. 22–39.

36. Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология рудных месторождений. – 1991. – Т. 33, № 4. – С. 81–91.
37. Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных рудах месторождения Томтор // Геохимия. – 2016. – № 12. – С. 1104–1121.
38. Летникова Е.Ф. Геохимическая специфика карбонатных отложений различных геодинамических обстановок северо-восточного сегмента палеоазиатского океана // Литосфера. – 2005. – № 1. – С. 70–81.
39. Мальцев М.В., Толстов А.В., Старкова Т.С. и др. Особенности вещественного состава кимберлитов Сюльдюкарского поля (Западная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2017. – № 4. – С. 37–43.
40. Маршинцев В.К. Кимберлитовые породы Якутии. – Якутск: Изд-во Якутского гос. ун-та, 1995. – 34 с.
41. Никулин И.И., Савко А.Д. Литология алмазоносных нижнеюрских отложений Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия). – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2009. – 134 с.
42. Поликашина Н.С. Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы. Скандий. – М.: ВИМС, 2016. – 65 с.
43. Поплавко Е.М., Иванов В.В., Карасик Т.Г. и др. О концентрации рения в нефтях, нефтяных битумах и горючих сланцах // Геохимия. – 1974. – № 9. – С. 1399–1402.
44. Проценко Е.В. Структурно-тектонические закономерности локализации алмазоносных кимберлитовых полей в пределах Вилуйско-Мархинской минерагенической зоны (Западная Якутия): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М.: ЦНИГРИ, 2020. – 24 с.
45. Склярков Е.В. Интерпретация геохимических данных. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 288 с.
46. Соболев В.К., Макеев А.Б., Кисель С.А. и др. Новые индикаторные признаки пород, вмещающих кимберлиты. – Сыктывкар: Геопринт, 2003. – 60 с.
47. Толстов А.В., Лапин А.В., Похиленко Н.П., Овчинников К.В. Скандий и иттрий Томторского рудного поля // Цветная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 37–43.
48. Толстов А.В., Минин В.А., Василенко В.Б. и др. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 3. – С. 227–240.

49. Томшин М.Д., Фомин А.С., Корнилова В.П., Черный С.Д., Яныгин Ю.Т. Особенности магматических формаций из Накынского кимберлитового поля Якутской провинции // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 12. – С. 1678–1689.
50. Торицова М.В., Кудинов Ю.А., Тимофеев П.В. Редкие металлы в нефтях, ископаемых углях, продуктах их переработки и минерализованных водах // Разведка и охрана недр. – 1996. – № 8. – С. 21.
51. Трофимов А.Ф., Пелецкий М.Н. и др. Проект на проведение поисков месторождений алмазов в пределах Мало-Ботуобинского лицензионного участка. – Мирный, 2014. – 120 с.
52. Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В. и др. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз). – М.: НИИ-Природа, 2005. – 540 с.
53. Фролов С.В., Карнюшина Е.Е., Коробова Н.И. и др. Особенности строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Вилуйского нефтегазового бассейна // Георесурсы. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 13–30.
54. Ходня М.С., Игнатов П.А., Лисковая Л.В. Вещественные признаки карбонатных флюидовзрывных образований Накынского алмазоносного поля Якутии // Отечественная геология. – 2018. – № 6. – С. 38–42.
55. Шмонов А.М. Геолого-структурные и минералого-геохимические признаки, присущие алмазоносным кимберлитовым телам дайково-жильного типа (на примере Накынского кимберлитового поля Якутии): дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Москва, 2014. – 180 с.
56. Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. – Санкт-Петербург: Недра, 2005. – 370 с.
57. Янин Е.П. Скандий в окружающей среде (распространенность, техногенные источники, вторичные ресурсы) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2007. – № 8. – С. 70–90.
58. Chassé M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Calas G. Scandium speciation in a world-class lateritic deposit // *Geochemical Perspectives Letters*. – 2017. – № 3. – P. 105–114.
59. Lapin A.V., Kulikova I.M., Tolstov A.V. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex Rare-metal ores of the Tomtor deposit // *Geochemistry International*. – 2016. – Vol. 54, № 12. – P. 1061–1078.
60. Lorenz V., Kurszlaukis S. Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2007. – Vol. 159. – P. 4–32.
61. Porritt L.A., Russell J.K., McLean H., Fomradas G., Eichenberg D. A Phreatomagmatic Kimberlite: The A418 Kimberlite Pipe, Northwest Territories, Canada // *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference*. – New Delhi: Springer, 2013. – P. 97–108.

62. Shvarov Yu.V. HCh: New potentialities for the thermodynamic simulation of geochemical systems offered by Windows // *Geochemistry International*. – 2008. – Vol. 46, № 8. – P. 834–839.
63. Shvarov Yu.V., Bastrakov E.N. HCh: a Software Package for Geochemical Equilibrium Modelling. User's Guide. – Canberra: Australian Geological Survey Organization, 1999. – 120 p.
64. Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuz'min D.V. et al. Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform // *Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – Vol. 59, № 10. – P. 1365–1379.
65. Teitler Y., Cathelineau M., Ulrich M., Ambrosi J.P., Munoz M., Sevin B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2019. – Vol. 196. – P. 131–155.
66. Williams-Jones A.E., Vasyukov O.V. The economic geology of Scandium, the runt of the rare Earth element litter // *Economic Geology*. – 2018. – Vol. 113, № 4. – P. 973–988.
67. Wang Z., Li Y., Liu Z.-R., Zhou M.-F. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – Vol. 128. – P. 103–120.
68. Средние содержания химических элементов // Геологический портал GeoKniga. Отдел «Геоэкология и геохимическое картирование» ИМГРЭ. – URL: <https://www.geokniga.org/geowiki/средние-содержания-химических-элементов> (дата обращения: 03.02.2022).
69. Rare-Earth Metals, Concentrate, Salts, Oxides, Magnets Prices | Rare Earth Prices Charts | SMM Metals Market [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.metal.com/prices/Rare-Earth> (дата обращения: 23.03.2025).