

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

### *Геология и полезные ископаемые*

УДК 553.493.67: 553.81(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-187-201>

*Оригинальная статья*

### **Пластовое и пластово-трещинное окисление в карбон-пермских отложениях и древней коре выветривания Западной Якутии и связанные с ним рудопроявления скандия**

**П. А. Игнатов<sup>✉</sup>, Р. У. Еременко<sup>1</sup>, А. В. Толстов<sup>2</sup>, И. М. Овчинников<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Российский государственный геологоразведочный университет  
им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,  
г. Якутск, Российская Федерация*

<sup>3</sup>*АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация*

<sup>✉</sup>[petrignatov@gmail.com](mailto:petrignatov@gmail.com)

#### **Аннотация**

В пределах поисковых на алмазы площадей Улахан-Курунг-Юрях и Бестях Мало-Ботуобинского района и в Сьюльдюкарском кимберлитовом поле Ыгыаттинского района выявлены признаки древнего пластового окисления в сероцветных и угленосных терригенных карбон-пермских отложениях и трещинно-пластового окисления на породах подстилающей каменноугольной коры выветривания, распространенной на карбонатно-терригенных отложениях верхнего кембрия. Процессы формирования зон пластового окисления подтверждены данными по распределению и корреляции U и Th, Sc и V. Предположение о рудоформирующем значении древних инфильтрационных гипергенных процессов подтверждено установленными по данным рентгенофлуоресцентных анализов концентрациями Sc в каменноугольных и триас-юрских корях выветривания и отложениях позднего палеозоя на площади Улахан-Курунг-Юрях, в Сьюльдюкарском и Накынском алмазоносных полях. В последних выделены перспективные рудопроявления Sc в древних корях выветривания, развитых по кимберлитам и среднепалеозойским базитам. Особый интерес представляет серия рудопроявлений Sc в районе деятельности алмазодобывающего Нюрбинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО).

**Ключевые слова:** древний гипергенез, зоны пластового и грунтового окисления, коры выветривания, скандий, кимберлиты, Якутия

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках исследований МГРИ по гранту Российского научного фонда (№ 23-27-00280 от 13.01.23).

**Для цитирования:** Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Пластовое и пластово-трещинное окисление в карбон-пермских отложениях и древней коре выветривания Западной Якутии и связанные с ним рудопроявления скандия. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):187–201. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-187-201>

## Formation and formation-fracture oxidation in Carbon-Permian sediments and ancient weathering crust of Western Yakutia and related scandium ore occurrences

P. A. Ignatov<sup>✉</sup>, R. U. Eremenko<sup>1</sup>, A. V. Tolstov<sup>2</sup>, I. M. Ovchinnikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation,

<sup>2</sup>Diamond and Precious Metal Geology Institute,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation,

<sup>3</sup>AK "ALROSA" (PAO), Mirny, Russian Federation

<sup>✉</sup>petrignatov@gmail.com

### Abstract

Within the areas of Ulakhan-Kurung-Yuryakh and Bestyakh of the Malo-Botuobinsky district, and in the Syuldyukar kimberlite field of the Ygyattinsky district, the carbonate-terrigenous deposits of the Upper Cambrian period revealed signs of ancient formation-oxidation in the gray-colored and coal-bearing, terrigenous carbon-Permian deposits, and fractured formation-oxidation commonly found on rocks of the underlying carboniferous weather crust. The data on the distribution and correlation of U and Th, Sc, and V confirmed the formation of the oxidation zone. The ore-forming significance of ancient infiltration hypergenic processes was confirmed by X-ray fluorescence analysis of Sc concentration in the Carboniferous and Triassic-Jurassic weathering crusts, and the Late Paleozoic sediments, in the Ulakhan-Kurung-Jurassic area, the Syuldyukar and Nakyn diamond-bearing fields. In the latter, we identified promising Sc ore occurrences in the ancient weathering crusts developed by kimberlites and Middle Paleozoic basites. The series of Sc ore occurrences are of particular interest in the diamond mining area of Nyurbinsky GOK AK ALROSA (PAO).

**Keywords:** ancient hypergenesis, zones of formation and soil oxidation, weathering crusts, scandium, kimberlites, Yakutia

**Funding.** This study was carried out within the research project of the Russian State University for Geological Prospecting and supported by the Russian Science Foundation (grant number 23-27-00280, dated 13.01.23).

**For citation:** Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M. Formation and formation-fracture oxidation in Carbon-Permian sediments and ancient weathering crust of Western Yakutia and related scandium ore occurrences. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):187–201. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-187-201>

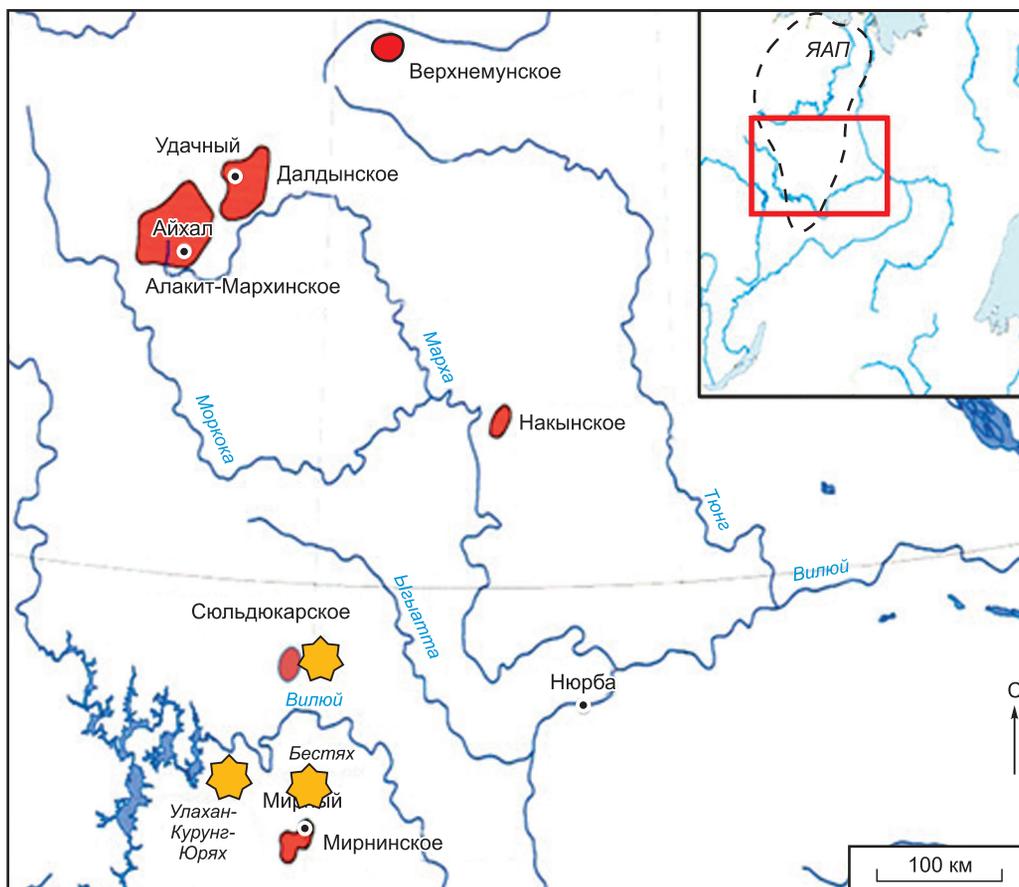
### Введение

В Мало-Ботуобинском и Ыгыаттинском алмазоносных районах Якутии, как и во всей западной Якутии, широко распространены горизонтально залегающие терригенные угленосные отложения карбона–перми. Они с несогласием перекрывают терригенно-карбонатные морские отложения раннего палеозоя, включающие силлы и дайки среднепалеозойских траппов, тела кимберлитов эруптивных брекчий базитов и коры выветривания каменноугольного возраста. На многих площадях они перекрыты туфами и силлами триасовых траппов и юрскими тонкообломочными морскими отложениями. Авторами подробно изучены разрезы нижнего и верхнего палеозоя на северо-западе и севере Мало-Ботуобинского района в пределах площадей Улахан-Курунг-Юрях и Бестях, в Сюльдюкарском поле Ыгыаттинского

и в Накынском поле Средне-Мархинского районов. В угленосных отложениях перми и подстилающих корах выветривания установлены признаки древнего пластового и пластово-трещинного окисления, с которым связаны высокие концентрации скандия и других ценных металлов. Это открывает перспективы обнаружения месторождений высоколиквидных полезных ископаемых в алмазоносных районах Якутии: редких земель, кобальта, никеля и скандия, потребление и рынок которого, предположительно, будут расти ежегодно по 7,6 %, согласно отчету IMARC Group [1].

### Методы и материалы

Признаки пластового окисления в угленосных отложениях перми выявлены на площадях Мало-Ботуобинского и Ыгыаттинского алмазоносных районов Якутии, отстоящих на сотни километров (рис. 1), что указывает на масштабное про-



**Рис. 1.** Положение площадей, в которых детально изучены разрезы палеозоя на схеме кимберлитовых полей юга Якутской провинции (по [2]). Оранжевой звездочкой отмечено проявление зон пластового окисления пород карбона–перми и триас–юрской коры выветривания (Накынское поле)

**Fig. 1.** The position of the areas in which Paleozoic sections have been studied in detail on the scheme of kimberlite fields in the south of the Yakut province (according to [2]). An orange asterisk marks the manifestation of zones of formation oxidation of carboniferous Permian and Triassic-Jurassic weathering crust rocks (Nakhyn field)

явление древних гипергенных процессов. Признаки пластово-трещинного окисления в корях выветривания каменноугольного возраста отмечены в указанных районах, а в корях выветривания поздне триас–раннеюрского возраста – в Накынском алмазоносном поле Средне-Мархинского района. Таким образом, проявления древних эпигенетических процессов широко проявлены в Западной Якутии.

Площадь Улахан-Курунг-Юрях занимает 8,2 км<sup>2</sup>. Здесь задокументировано 244 разреза по керну достаточно плотной сети поискового бурения (от 200×200 до 100×100 м). В ее пределах во многих разрезах карбонатно-тонкообломочные морские отложения верхнекембрийской холмологской свиты покрыты образованиями древней коры выветривания, перекрытыми сероцветными песчаными каменноугольными отложениями ботуобинской свиты, пермскими угленосными

отложениями боруллойской свиты и сероцветными песчаными отложениями юры (рис. 2).

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 [3]. 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 [4].

Минеральный состав, литолого-фациальные характеристики и палеогеографические условия накопления карбон-пермских отложений Западной Якутии хорошо изучены и опублико-

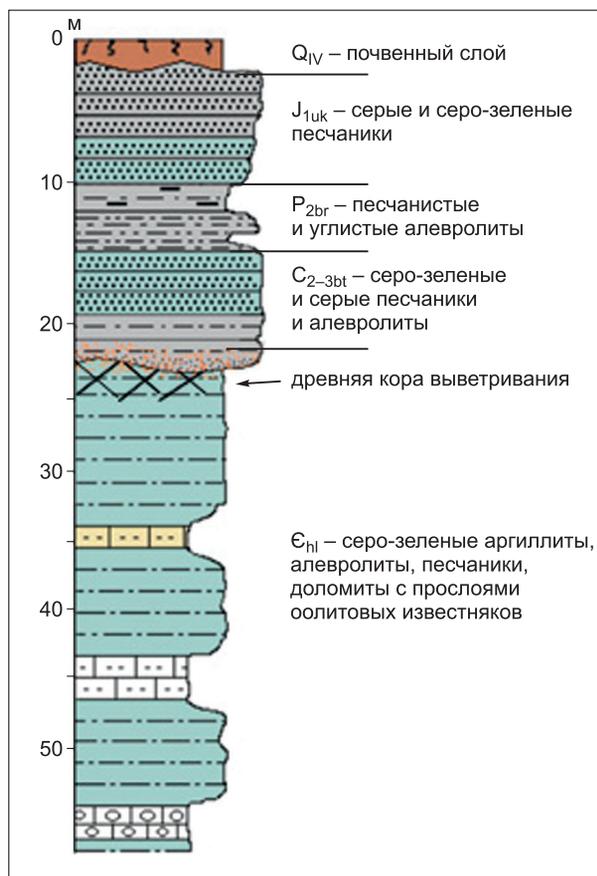


Рис. 2. Разрез по скважине 74,925–224,5 на площади Улахан-Курунг-Юрях

Fig. 2. Well section 74,925–224,5 in the Ulahan-Kurung-Yuryakh area

ваны в работах В.П. Афанасьева, И.И. Антипина, Е.Н. Белова, Н.Н. Зинчука, И.Е. Калмыкова, Б.А. Коробкова, М.В. Куликова, С.Ф. Павлова, В.Г. Подвысоцкого, О.Г. Салтыкова, В.Н. Устинова, Ю.М. Эринчека и др. Однако, до сих пор для этих толщ не были отмечены признаки эпигенетического окисления. Такие признаки авторы обнаружили в рассматриваемых первично сероцветных породах верхнего палеозоя и в захороненной коре выветривания каменноугольного возраста. Подобные образования выявлены и в разрезах поисковой площади Бестях. С этими образованиями связаны концентрации скандия и сопутствующих металлов, чему и посвящена предлагаемая статья.

### Результаты и обсуждение

Признаки зон внутрипластового окисления (ЗПО) в разрезах ботубинской и боруллойской свит выражены лимонитизацией и осветлением



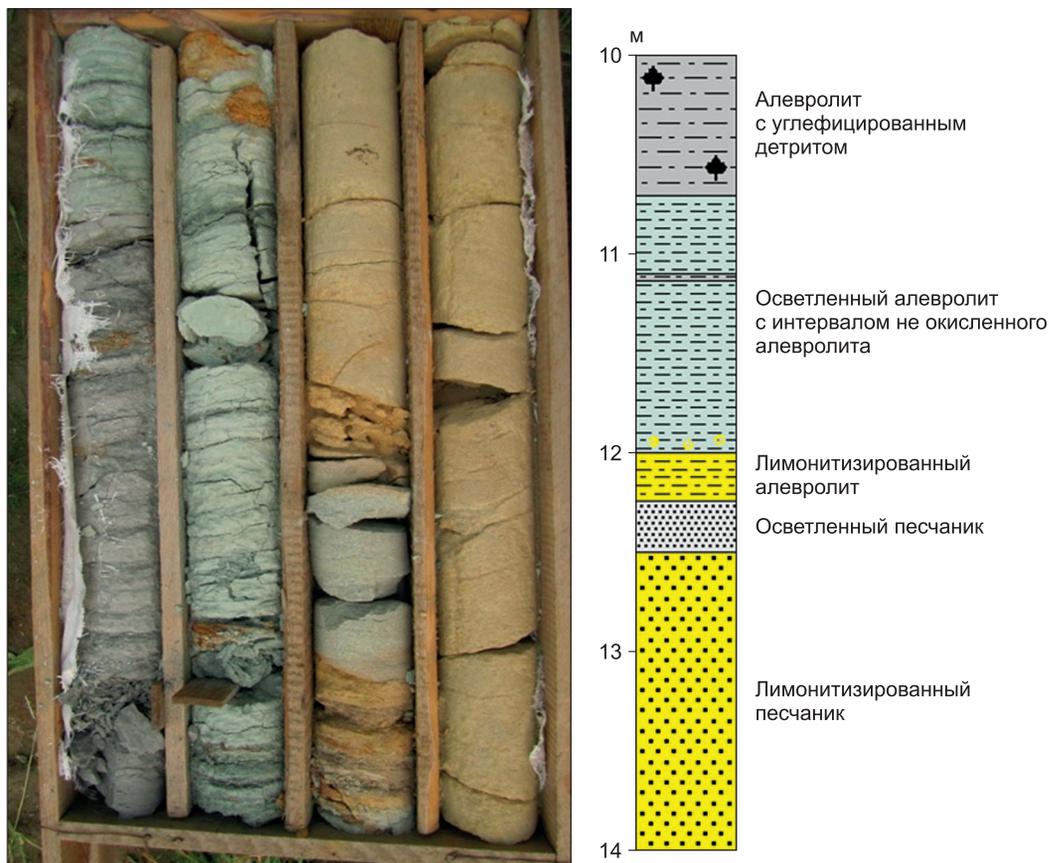
Рис. 3. Контакт неокисленных серых алевролитов (слева внизу) и лимонитизированных песчаников ботубинской свиты. Скважина 75,125–215,5, интервал 17–21 м

Fig. 3. Contact of non-oxidized gray siltstones (bottom left) and limonitized sandstones of the Botuobin formation. Well 75,125–215,5, interval 17–21 m

первично сероцветных пород. Подобные изменения характерны и полно описаны для месторождений урана песчаникового типа в работах Г.В. Грушевого, А.К. Лисицына, М.Ф. Максимовой, Г.А. Машковцева, А.И. Перельмана, И.Г. Печенкина, С.Д. Расуловой, В.Н. Щеточкина, Е.М. Шмариовича, Д. Блайла, В. Финча, Г. Шоу и др. Они успешно используются в практике поисково-оценочных и разведочных работ на уран и сопутствующие редкие и рассеянные элементы. Проявления окислительных пластово-инфильтрационных процессов в породах карбона–перми на площади Улахан-Курунг-Юрях выражены различно и, очевидно, отражают разную степень окисления. При полном окислении органического вещества и темноцветных минералов  $Fe^{+2}$  ярко-желтые лимонитизированные песчаники контактируют с первично сероцветными породами (рис. 3).

В случае неполного окисления органического вещества породы имеют белесый и светло-салатный цвет и контактируют с лимонитизированными породами (рис. 4).

В других случаях отмечается чередование лимонитизированных и осветленных интерва-



**Рис. 4.** Зоны пластового окисления в породах ботубобинской свиты, снизу вверх (слева направо): неизменные серые алевролиты, осветленные салатово-светло-зеленые, лимонитизированные мелкозернистые песчаники с прослоем осветленных песчаников, алевролиты боруллойской свиты. Скважина 74,61–217,5, интервал 10–14 м

**Fig. 4.** Zones of formation oxidation in the rocks of the Botuobin formation, from bottom to top, (from left to right): unchanged gray siltstones, clarified light green-light green, limonitized fine-grained sandstones with a layer of clarified sandstones, siltstones of the Borullo formation. Well 74.61-217.5, interval 10–14 m

лов, что указывает на сложное неполное окисление. Встречается и мелкопятнистая лимонитизация или небольшие до первых метров интервала осветления, свидетельствующие о начальных стадиях окисления. В некоторых разрезах пластовое окисление представлено лишь осветленными песчаниками и алевролитами.

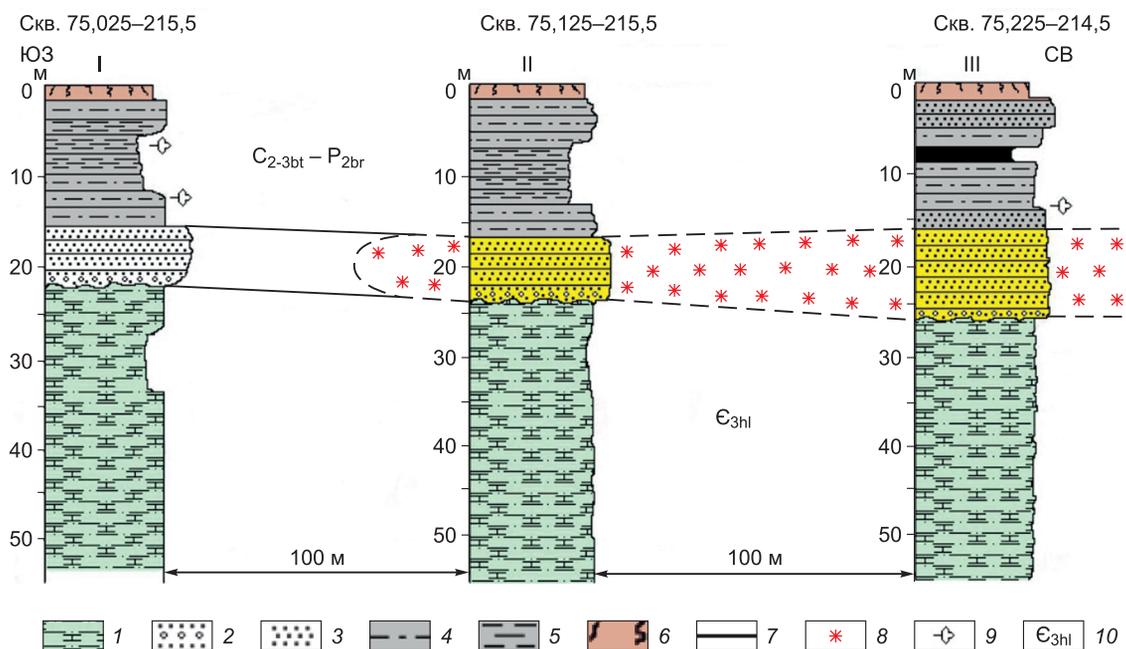
Практически аналогичные проявления окислительных процессов имеют место и в разрезах карбона–перми в пределах поисковой площади Бестях. Здесь изучен керн 131 скважины на площади 6000 км<sup>2</sup>. В большинстве случаев вскрыты лимонитизированные и осветленные разности песчаников. Такое широкое площадное распространение окислительных процессов указывает на значительные масштабы массообмена.

На площади Улахан-Курунг-Юрях внутри лимонитизированных и обеленных пород встречены маломощные в первые сантиметры линзы

черного цвета с сульфидами железа. Они представляются локальными участками вторичного восстановления, связанными с деятельностью сульфат-редуцирующих бактерий.

Доказательством развития внутрипластового окисления в рассматриваемой толще служит фрагмент латеральной зональности со сменой лимонитизации и полного окисления соединений железа и органического вещества на осветленные породы, где соединения двухвалентного железа не окислены, а углистый материал окислен (рис. 5).

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-гидро-слюдистыми глинами с интервалами сидерита. Ее



**Рис. 5.** Латеральная зональность пластового окисления в сероцветных карбон-пермских отложениях на северо-востоке площади Улахан-Курунг-Юрях. 1 – известковистые алевролиты хололомолокской 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

**Fig. 5.** Lateral zonation of formation oxidation in gray-colored carboniferous Permian deposits in the north-east of the Ulakhan-Kurung-Yuryakh area. 1 – calcareous siltstones of the Kholomolokha Formation of the Cambrian; 2 – medium-grained sandstones with pebbles in the basal layer; 3 – clarified and gray-colored sandstones; 4 – siltstones; 5 – mudstones; 6 – soil layer; 7 – brown coal; 8 – limonitized sandstones; 9 – vegetable detritus; 10 – age of deposits

строение и минеральный состав подробно описаны в работах Н.Н. Зинчука [4]. 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. 6).

Трещинно-пластовое окисление широко распространено и отсутствует лишь в разрезах, где коры выветривания нет. Характерно, что внутри осветленных и лимонитизированных зон практически повсеместно в нижней части встречаются интервалы 10–40 см тяжелых пород вишнево-красного цвета, сложенных сидеритом и гетитом. Часто с сидеритом встречаются зерна пирита. Сидерит с пиритом залегает под существенно глинистой и более рыхлой монтмориллонит-гидрослюдистой частью каменноугольной (поздний девон-раннекаменноугольной) коры выветривания, что отмечено в Мало-Ботуобинском районе [4]. Надо полагать, что осветление этой верхней части коры выветривания, пятна лимонитизации с гематитом являются следами наложения более поздних

окислительных процессов. В ряде случаев зафиксированы непрерывные переходы внутрислового окисления в породах ботуобинской свиты, распространяющегося в горизонты подстилающей коры выветривания, как в приведенном выше примере (см. рис. 6).

В некоторых разрезах верхней части хололомолокской свиты кембрия обнаружено окисление по крутопадающим трещинам. Оно может распространяться до глубины 25 м от контакта с перекрывающими отложениями. Отмеченные факты позволяют предположить, что при развитии зон окисления существовал единый водоносный комплекс, включавший пласты песчаников в карбоне-перми, трещинно-пластовый коллектор коры выветривания и линейные трещинные зоны в крутопадающих разломах в породах кембрия.

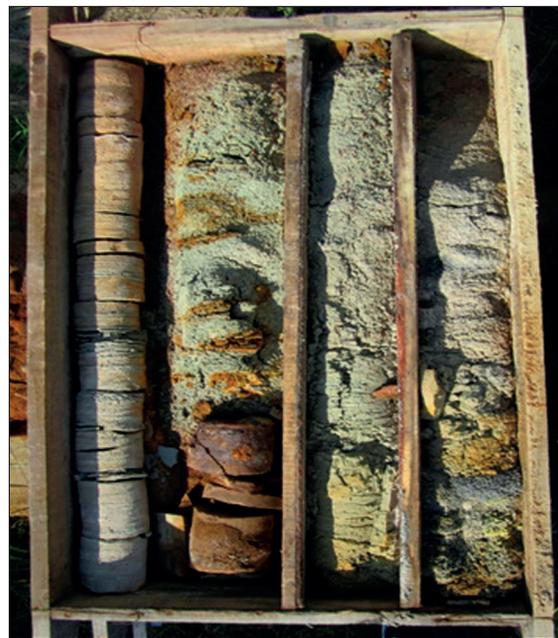
Важно отметить присутствие гипса, ангидрита и ярозита в окисленных породах (см. рис. 6). Гипс встречается в виде друз игольчатых бесцветных кристаллов в трещинах пород кембрия и в виде мелкозернистых агрегатов в цементе лимонитизированных песчаников ботуобинской

свиты карбона. Вместе с ангидритом и примесью анальцима он слагает белые маломощные, в первые сантиметры прожилки, встречающиеся в лимонитизированных породах верхнего палеозоя.

Присутствие сульфатов явно указывает на окислительный сернокислый состав подземных вод, формировавших пластовое и трещинное окисление. Унаследованно эти воды сохранились в ручье Улахан-Курунг-Юрях. По данным гидрогеологов Вилойской ГРЭ, они имеют гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый-натриевый состав. Присутствие окислительных сульфатных вод в верхней части рассматриваемых разрезов объясняет широкое распространение техногенных поверхностных гематитовых корок до первых сантиметров, развитых на керне сидерита из древней коры выветривания. Картирование такого рода выделений гипса показало, что они приурочены к выходам на поверхность блоков кембрийских пород. Этот факт свидетельствует о том, что содержащие кислород и сульфат-ион подземные воды на этом и других выступах встречали на своем пути кальциевую карбонатную среду, в которой отлагался гипс.

Окислительно-восстановительные процессы в породах карбона–перми и в подстилающей коре выветривания подтверждаются радиогеохимическими данными, полученными в результате литогеохимического опробования и рентгенофлюоресцентным анализом (РФА), выполненным в ЦАЛ Вилойской ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО). В породах верхнего палеозоя коэффициент корреляции между торием и ураном, рассчитанный по 42 РФА-анализам, составил 0,95 при Th/U более 4. Это соответствует кларковым содержаниям и отсутствию привноса-выноса урана. А тот же коэффициент, рассчитанный по 97 анализам при Th/U менее 4, составил 0,25. При этом субфоновые содержания урана растут, а тория практически неизменны. Это отражает миграцию урана и его осаждение на восстановительном и частично сорбционном лимонитовом барьере, а также относительную концентрацию радия в сульфатной среде.

На возраст зон пластового и трещинно-пластового окисления косвенно указывают следующие факты. Во-первых, горизонты с признаками ЗПО перекрыты юрскими отложениями, в которых нет признаков окисления. Во-вторых, в одном из разрезов в базальном слое юрских отложений зафиксированы гальки лимонитизированных песчаников. В-третьих, встречены разрезы,



**Рис. 6.** Пример трещинно-пластового окисления по древней плачевидной коре выветривания, охватившей известковистые глинистые породы кембрия. Осветленные алевролиты ботубинской 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

**Fig. 6.** An example of fractured-formation oxidation along the ancient mantle-shaped weathering crust, which covered calcareous clay rocks of the Cambrian. Clarified siltstones of the Botuobin Formation with spotted limonitization and also clarified with spots of limonite, loose calcareous clays and goethite-hematite-siderite aggregate with a capacity of 30 cm in the weathering crust, Borehole 74.925–234.5, interval 16–20 m

в которых нарушено субгоризонтальное залегание лимонитизированных песчаников позднего палеозоя с углами наклона 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 внутрислового, пластово-трещинного и трещинного окисления могли быть связаны процессы эпигенетического рудообразования [5, 6]. В частности, возможны рудные концентрации базитофильных элементов – Sc, V и, возможно, Re. Особый интерес представляет Sc. Такие типы месторождений являются промышленными [7–13]. По данным 1579 рентгенофлюоресцентных анализов на

**Распределение скандия и ванадия из разных осадочных образований на площади Улахан-Курунг-Юрях**

**Distribution of scandium and vanadium from different sedimentary formations in the Ulakhan-Kurung-Yuryakh area**

Осадочные образования	Коэффициент корреляции Sc/V	Среднее значение выборки Sc	Медианное значение выборки Sc	Среднее значение выборки V	Медианное значение выборки V
Каменноугольная кора выветривания по кембрийским породам	0,16	14,63	13,34	116,08	113,5
Кембрийские породы	0,21	7,88	6,57	78,89	72,05
Карбон-пермские породы	0,4	11,85	11,45	77,122	71,99
Общая выборка	0,25	8,56	7,68	78,4	71,66

*Примечание.* Использовано по 1579 анализов РФА, аналитик Степанова Т.В., ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО).  
*Note.* 1579 XRF analyses were used, analyst T.V. Stepanova, VGRE AK ALROSA (PAO).

площади Улахан-Курунг-Юрях отмечается рост средних содержаний ванадия и скандия, превышающих кларки, в породах коры выветривания несколько повышенные относительно пород кембрия и верхнего палеозоя (табл. 1).

Многочисленные данные РФА заверены анализами ICP AES по 30 штучным пробам, отобраным для анализа древней зоны окисления в угленосных отложениях и древней коре выветривания (табл. 2).

По данным ICP AES установлены повышенные концентрации обоих элементов в эпигенетически измененных породах карбона–перми по сравнению с окисленными породами коры выветривания по породам кембрия. Повышенные содержания в угленосных терригенных отложениях связаны с местами контакта окисленных (лимонитизированных или осветленных) и неизмененных первично сероцветных пород в зоне геохимического барьера. В коре выветривания повышенные содержания сопровождаются рыхлыми осветленными белесо-салатного цвета карбонатные алевритистые глины, которые, очевидно, создавали щелочной и сорбционный геохимический барьеры.

Следует отметить, что в зонах пластового окисления в карбон-пермских отложениях корреляция ванадия и скандия ( $K = 0,4$ ) заметно выше (см. табл. 1), чем в коре выветривания ( $K = 0,22$ ), что, наверное, отражает разные барьеры осаждения – сорбционный и pH для Sc и Eh для V.

Наиболее ценным является Sc, стоимость которого на мировом рынке при чистоте 9,99 в по-

следние годы превышает 1500 долларов США за 1 кг [7, 9, 12, 13]. Из более чем 1500 анализов по площади Улахан-Курунг-Юрях в 44 пробах содержание Sc установлено от 30 до 82 ppm (до 7 кларков-концентраций для глинистых пород). Абсолютное большинство этих значений выявлено в глинистых породах коры выветривания или в терригенных отложениях верхнего палеозоя. Надо отметить, что опробование было нацелено на обнаружение геохимических признаков кимберлитов или их минеральных индикаторов, но отнюдь не на Sc, который вообще не определялся.

В коре выветривания Sc мог накапливаться дважды во время их формирования и после в результате пластового и трещинно-пластового окисления. В терригенных породах карбона–перми его концентрации могут быть связаны со скоплениями акцессорного ильменита, переотложенного материала кор выветривания и зонами выклинивания пластового окисления. Большая часть проб с таким повышенными содержаниями Sc локализована под триасовыми траппами (рис. 7), которые могли служить региональным водоупором в древнем инфильтрационном артезианском бассейне.

Можно предположить, что выявленные концентрационные ореолы Sc фиксируют сложную зону выклинивания внутрипластового окисления в породах верхнего палеозоя и площадной сорбционный и щелочной барьеры его осаждения в карбонатно-глинистом материале древней коры выветривания.

## Содержания Sc и V на площади Улахан-Курунг-Юрях, г/т

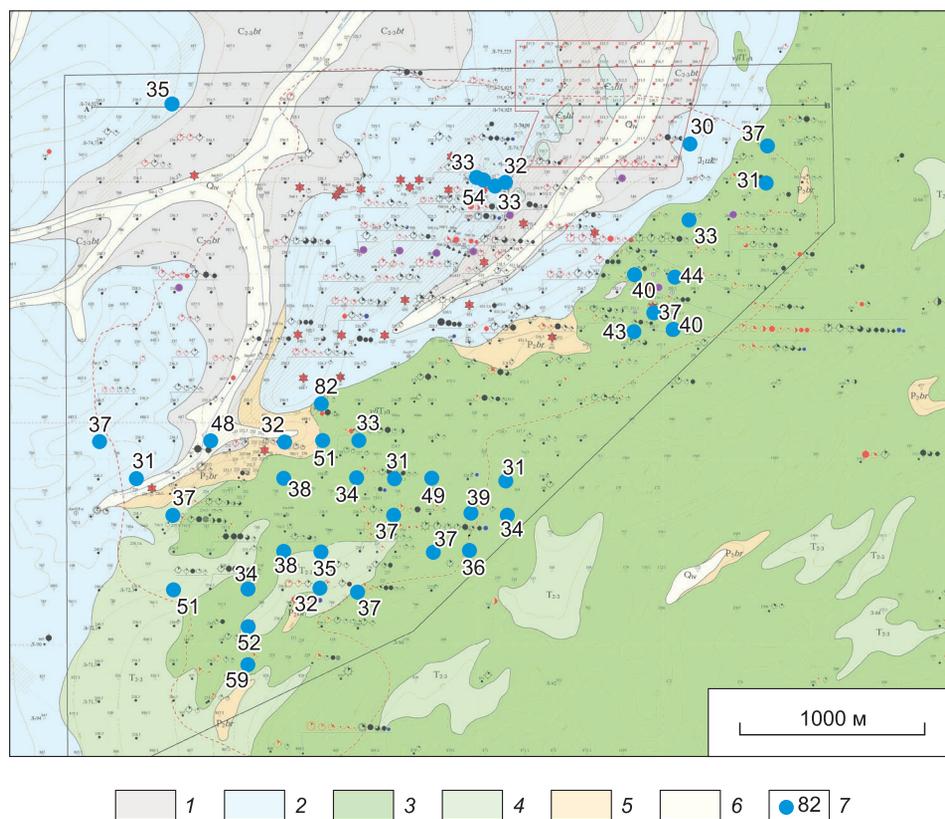
Table 2

## Sc and V contents in g/t in the Ulakhan-Kurung-Yuryakh area

Линия бурения	Номер скважины	Глубина, м	Порода	Sc, ppm	V, ppm
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	Осветленный 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	Осветленный алевролит	20,13	133,60
75,025	213,5	9	Лимонитизированный алевролит	19,58	129,70
Породы коры выветривания по хололохской 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	Осветленная 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
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	Осветленная 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 черной породы с пиритом	4,68	60,29

*Примечание.* Анализы ICP AES выполнены в ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО). < побн – значение меньше предела определения.

*Note.* The ICP-AES analyses were performed at VGRE AK ALROSA (PAO). < побн – the value is less than the definition limit.



**Рис. 7.** Распространение концентраций Sc в породах карбона–перми и кембрия с содержаниями более 30 ppm. 1 – современные четвертичные отложения; 2 – юрская система, нижний отдел, укугутская свита; 3 – магматические образования ахтарандинского комплекса; 4 – триасовая система, средний–верхний отдел; 5 – пермская система, верхний отдел, боруллойская свита; 6 – каменноугольная система, средний–верхний отдел, ботуобинская свита; 7 – концентрация Sc, ppm

**Fig. 7.** Distribution of Sc concentrations in Carboniferous-Permian and Cambrian rocks with contents of more than 30 ppm. 1 – Modern Quaternary deposits; 2 – Jurassic system, lower section, Ukugut Formation; 3 – magmatic formations of the Akhtaran-dinsky complex; 4 – Triassic system, middle-upper section; 5 – Permian system, upper division, Borulloy Formation; 6 – carbonif-erous system, middle-upper division, Botuobin Formation; 7 – concentration of Sc, ppm

Для прогнозной оценки Sc следует рассмотреть геолого-промышленные типы его месторождений. Согласно классификациям [6, 8], во всех месторождениях как эндогенного, так и экзогенного классов скандий является попутным компонентом. Выделено 15 потенциально-промышленных типов месторождений скандия [8]: магматические 1) Sc–V в ильменит-титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий; 2) Sc–V в апатит-ильменитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий в анортозитах; 3) Sc–Pt с Co–Ni-рудами в ультрамафитах; пегматитовые 4) REE-Sc в тортвейтитовых пегматитах; грейзеновые 5) Sc в W–Sn; метасоматические 6) Sc в U-месторождениях с давидитовой минерализацией; 7) U-редкометалльно-Sc в щелочно-карбонатных метасоматитах; 8) железорудные метасоматиты; в корах выветривания 9) Sc-REE-Nb в переотложенных КВ карбонатитов (90 % Sc

из Баюнь Обо); 10) Sc в латеритных корах выветривания по ультрабазитам с кобальт-никелевыми рудами; осадочные 11) Sc в рудах REE-P-U-месторождений в костных остатках рыб; 12) Sc в Zr–Ti прибрежно-морских россыпях; 13) Sc в Ti-россыпях ближнего сноса; 14) Sc в россыпях ближнего сноса грейзеновых руд W–Sn; эпигенетические 15) V–Sc–Re в рудах U пластово-инфильтрационных месторождений в песчаниках; 16) Sc в углях.

Похожую более упрощенную классификацию собственно скандиевых месторождений предложил Чженчао Вонг с соавторами [13]. В этой классификации среди гипергенных (супергенных) выделяются три типа месторождений в реголитах: развитые по мафит-ультрамафитовым породам, по карбонатитам и в морских осадочных отложениях.

Полученные данные по наличию древней зоны пластового окисления в отложениях верхнего

палеозоя и широкое распространение в Западной Якутии кор выветривания каменноугольного (поздний девон–каменноугольного) и триас-юрского возрастов [4, 14] позволяют считать, что в регионе можно ожидать месторождения Sc трех типов [15]: 1) в зоне выклинивания ЗПО в угленосных породах карбона–перми; 2) в трещинно-пластовых и трещинных ЗПО в глинах древних кор выветривания по породам кембрия; 3) в древних корях выветривания по кимберлитам и базитам

Четвертым типом месторождений скандия могут стать грунтовые над- или межмерзлотные сернокислые воды как аналоги ионно-адсорбционных «жидких» руд редких металлов, осваиваемых в Китае [7]. При этом надо иметь в виду, что в проектах освоения карьерным способом с сернокислотным выщелачивание скандия из комплексных кобальт-никелевых руд в латеритах Австралии и Новой Каледонии, развитых по ультрабазитам, содержания скандия колеблются от 41 до 262, достигая 1500 ppm [7, 11].

На территории Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) разведано и готовится к эксплуатации крупнейшее Nb–TR-месторождение Томтор с рудами в переотложенных эпигенетически измененных корях выветривания со средним содержанием скандия 200 ppm [5–7, 16–18].

Примером концентраций скандия в зонах выклинивания внутрипластового и трещинно-пла-

стового окисления являются отмеченные выше ореолы на площади Улахан-Курунг-Юрях.

Учитывая выделенные типы вероятных месторождений Sc, были проанализированы данные РФА-анализов по двум алмазоносным полям Якутии – Сьюльдюкарскому и Накынскому. Сьюльдюкарское алмазоносное поле Ыгыаттинского района Якутии имеет весьма близкое геологическое строение с Мало-Ботуобинским районом, включающим изученные площади Улахан-Курунг-Юрях и Бестях. В разрезах позднего палеозоя здесь также отмечены признаки эпигенетического пластового окисления. Как оказалось, из 4082 анализов в 109 содержания Sc превысили 30 ppm, в 12 пробах – 100 ppm. 9 проб с такими концентрациями отобраны из Сьюльдюкарских кимберлитов, причем 6 из них взяты из древней коры выветривания и расположены на глубинах 30–50 м (табл. 3).

Все они локализованы вдоль одной линии рудовмещающего субширотного сдвига крутого падения, выявленного по ряду признаков [19]. Полоса скандиевого оруденения составляет не менее 400 м при ширине не менее 10 м и мощности не менее 2 м и представляется перспективным рудопроявлением. Вместе со Sc в выветрелых кимберлитах отмечаются высокие концентрации Co, Ni, La и Ce, что повышает перспективы этого объекта. Интересно отметить, что порядки содержания Co, Ni, V и платиноиды на данном ру-

Таблица 3

**Аномальные концентрации скандия в породах Сьюльдюкарского поля**

Table 3

**Abnormal concentrations of scandium in rocks of the Syuldyukar field**

Номер скважины	Глубина, м	Возраст	Порода	Содержания Sc, ppm
12–22	126	iPz2	Кимберлитовая брекчия	164,9376
12–22	112	iPz2	То же	128,1744
12–22	102	iPz2	«-»	142,5816
12–26	175	iPz2	«-»	105,363
16–22	30,3	iPz2	«-»	163,944
20–22	37	iPz2	«-»	107,9505
20–22	77	iPz2	«-»	106,7568
20–22	123	iPz2	«-»	106,2945
24–22	38,5–44	G3hl	Доломиты алевритистые	143,7888
32–20	53	iPz2	Кимберлитовая брекчия	155,9952
32–18	41,8–47	G3hl	Мергель доломитовый	204,516
134–98	59,1	P1ah	Песчаники тонкозернистые	123,372

допроявлении сопоставимы с таковыми на месторождении Кониамбо в Новой Каледонии [11]. Концентрации лантана и церия намного выше в якутском объекте, что, вероятно, отражает в принципе повышенный геохимический фон редких земель в кимберлитах Якутии [20, 21].

В большем количестве рудные концентрации скандия обнаружены в Накынском алмазоносном поле, где осваиваются месторождения алмазов. Здесь из 30802 рентгенофлюоресцентных анализов литогеохимических проб в 938 содержания скандия превысили 30 ppm, а в 37 пробах – 100 ppm.

В большинстве случаев (28 проб из 37) они связаны с породами дяхтарской свиты триас-юрского возраста. В одном случае рудным оказалась кора выветривания по среднепалеозойским долеритам. Дяхтарская свита представляет собой материал переотложенных кор выветривания известковистого монтмориллонит-гидро-слиудистого состава [14, 22]. Рассматриваемые пробы отобраны с глубин от 63 до 85,5 м. По большей части они представлены глинами, что указывает на близкий к элювию материал. Кроме того, пробы с аномальными концентрациями скандия взяты в местах палеоподнятий, обрамляющих впадины, в том числе Дюлюнг-Дяхтарскую и Уолбинскую депрессии дяхтарского времени, выявленные геологами Вилюйской ГРЭО [22]. По сближенным скважинам с концентрациями скандия выделен ряд участков. В одном из них вскрыт концентрационный ореол скандия протяженностью более 2 км и шириной более 50 м, расположенный на юго-западе Накынского поля.

Он находится в узле пересечения крупных Дюостахского и Западного разломов, выполненных дайками основного состава девонского возраста. По нашим данным, в центр этого узла попадает и проекция Диагонального разлома, контролирующего тела алмазоносных кимберлитов. Следует учитывать, что именно в разломах северо-восточного простирания в Накынском поле и узлах их пересечения с другими нарушениями сосредоточены трубки взрыва щелочно-базитового состава [23–25].

Скандиевый ореол вытянут более чем на 2 км вдоль Дюостахского нарушения. Его параметры определяют возможность предполагать здесь месторождение скандия. Важно отметить, что в том же Дюостахском разломе в 5 км юго-западнее от края этого ореола в скв. 340-345 на глубине 77 м в алеволитах дяхтарской свиты обнаружено 241,2 ppm скандия.

Другой участок сближенных на площади концентраций скандия расположен на западе Накынского поля в узлах пересечения Лиендокитского и Северного, а также Западного, Ботубинского и Лиендокитского разломов. Здесь надо отметить серию из четырех скважин, расположенных по широте в узлах пересечения упомянутых разломов. В них содержание скандия составляет выше 200 ppm. Надо отметить скважину 396–472, в которой в четырех пробах, отобранных с глубин 30,4, 37,4, 42,4 и 52,4 м, охвативших пачку в 22 м, содержания скандия составили соответственно 107,7, 130,2, 133,7 и 452,4 ppm. В последней, очевидно рудной по скандию, пробе концентрации церия составили 110,4 ppm.

В Накынском поле имеется еще 12 разрезов по поисковым скважинам, в которых в глинах дяхтарской свиты примерно на тех же глубинах определены содержания скандия выше 100 ppm. Породы среднепалеозойских траппов могли быть источниками скандия, поскольку в них отмечены весьма высокие его концентрации. Так, А.И. Киселев [25] приводит следующие содержания скандия по данным ICP MS, ppm: в докимберлитовых дайках базитов Вилюйско-Мархинской зоны – 26, 31, 32, 33, 34, 38, 36, 40, 42, 331 и 400; в силлах Накынского поля – 34, 369, 372 и 407; в посткимберлитовых базитах тр. Нюрбинская – 20, 23, 34, 36, 38, 38, 40, 366, 423, 424, 431, 437, 480; в монцонит-порфирах тр. Нюрбинская – 181, 199 и 479.

Значительное число проб с повышенными и рудными содержаниями скандия и ряда сопутствующих элементов определяют большой поисковый потенциал на скандий, прежде всего Накынского поля. Вполне вероятно, что здесь скандий и другие металлы накапливались в два этапа: во время поднятий в позднем девоне–раннем карбоне и формирования кор выветривания и в триасе при образовании кор выветривания и инфильтрации агрессивных сульфатных окислительных кислых грунтовых вод при наличии щелочно-сорбционного барьера осаждения скандия в глинистых горизонтах верхних частей коры выветривания.

### Заключение

Представленные материалы позволяют сделать следующие выводы.

Впервые в верхнепалеозойских толщах Западной Якутии в областях поднятий установлены

проявления древнего пластового и трещинно-пластового окисления. Последнее затрагивает каменноугольные перекрытые коры выветривания.

Предположение о масштабных рудообразующих процессах в связи с древним инфильтрационным эпигенезом, в том числе наложенных на материал древних кор выветривания, реализовано на примере рудных концентраций скандия.

Среди промышленных типов месторождений скандия выделены наиболее перспективные для Якутии в корях выветривания по карбонатитам, кимберлитам, базитам и монцититам и в зонах выклинивания внутрипластового окисления. На северо-западе Мало-Ботуобинского района на поисковой площади Улахан-Курунг-Юрях возможны ионно-адсорбционные руды скандия в надмерзлотных грунтовых водах.

На основе многочисленных данных рентгенофлуоресцентных и, меньше, ICP MS анализов в Слюдюкарском и Накынском алмазоносных полях Якутии выявлена серия рудопроявлений скандия с содержаниями выше 100 и максимумом 462 ppm. Большинство из них локализованы в каменноугольных и триас-юрских перекрытых корях выветривания и расположены на глубинах до 90 м.

Рудопроявление скандия в коре выветривания по Слюдюкарским кимберлитам содержит высокие концентрации кобальта, никеля, лантана и церия, которые могут оказаться попутными компонентами. В Накынском поле в рудопроявлениях скандия встречаются высокие концентрации церия.

Особенно интересными представляются рудопроявления на западном фланге Накынского поля, в котором осуществляется промышленное освоение алмазных месторождений. Эти участки могут оказаться экономически ценными месторождениями скандия и попутных редкоземельных элементов цериевой группы.

Учитывая, что в Западно-Якутской алмазоносной провинции широко распространены источники скандия – породы траппов среднего палеозоя, известно более 1500 кимберлитовых тел и сотни тел эруптивных брекчий базитов, потенциал на скандий и сопутствующие ценные металлы представляется достаточно большим.

### Список литературы / References

1. *Scandium Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022-2027*. IMARC Services Pvt. Ltd.; 2022. 143 p.

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

Kostrovitsky S.I., Spetsius Z.V., Yakovlev D.A. *Atlas of primary diamond deposits of Yakutian kimberlite province*. Mirny; 2015. (In Russ.)

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

Korobkov I.G. *Tectonics, paleogeography and basite magmatism of diamond-bearing areas of the eastern side of the Tunguska syncline*. Irkutsk: IEC SB RAS; 2015. 353 p. (In Russ.)

4. Зинчук Н.Н. *Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та; 1994. 240 с.

Zinchuk N.N. *Weathering crusts and secondary changes of kimberlites of the Siberian platform*. Novosibirsk: NSU Publishing House; 1994. 240 p. (In Russ.)

5. Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность. *Геология рудных месторождений*. 1991;33(4):81–91.

Lapin A.V., Tolstov A.V. Oxidative and reducing stages of formation of the hypergenesis zone of carbonatites and their ore content. *Geology of Ore Deposits*. 1991;33(4):81–91. (In Russ.)

6. Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных рудах месторождения Томтор. *Геохимия*. 2016;(12):1104–1121. <https://doi.org/10.7868/S0016752516120062>

Lapin A.V., Tolstov A.V., Kulikova I.M. Distribution of Ree, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit. *Geochemistry International*. 2016;54(12):1061–1078. <https://doi.org/10.1134/S0016702916120065>

7. Быховский Л.З., Потанин С.Ж., Котельников Е.И., Ануфриева К.И. и др. Редкоземельное и скандиевое сырье России. *Минеральное сырье*; 2018;31:216.

Bykhovsky L.Z., Potanin S.Zh., Kotelnikov E.I., Anufrieva K.I. et. al. Rare earth and scandium raw materials of Russia. *Mineral raw materials*; 2018:216. (In Russ.)

8. Ключарев Д.С. *Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы*. Рений. Редактор Спорыхина Л.В. Справочник. М.: ВИМС; 2016. 39 с.

Klyucharev D.S. *Requirements for the quality of mineral raw materials containing rare and rare earth metals*. Renius. Moscow: VIMS; 2016. 39 p. (In Russ.)

9. Поликашина Н.С. *Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы*. Скандий. Справочник. М.: ВИМС; 2016. 65 с.

Polikashina N.S. *Requirements for the quality of mineral raw materials containing rare and rare earth met-*

- als. Scandium. Handbook. Moscow:VIMS; 2016. 65 p. (In Russ.)
10. Chassé M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Calas G. Scandium speciation in a world-class lateritic deposit. *Geochem. Persp. Let.* 2017;(3):105–114. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1711>
11. Teitler Y., Cathelineau M., Ulrich M., Ambrosic J.P., Munoz M., Sevine B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites. *Journal of Geochemical Exploration.* 2019;196:131–155. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.10.009>
12. Williams-Jones A.E., Vasyukov O.V. The economic geology of Scandium, the runt of the rare Earth element litter. *Economic Geology.* 2018;113(4):973–988. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4579>
13. Zhenchao Wang, Yan Hei Li M., Ze-Rui Ray Liu, Mei-Fu Zhou. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. *Ore Geology Reviews.* 2021;128. 103906. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103906>
14. Никулин И.И., Савко А.Д. *Литоология алмазных нижнеюрских отложений Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия)*. Воронеж: Воронежский государственный университет; 2009. 134 с.
- Nikulin I.I., Savko A.D. *Lithology of diamond-bearing Lower Jurassic deposits of the Nakyn kimberlite fields (Western Yakutia)*. Voronezh: Voronezh State University; 2009. 134 p. (In Russ.)
15. Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазоносной провинции. *Горный журнал.* 2022;(7):12–21. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.02>
- Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M. Prospects for the identification of scandium deposits in the Yakut diamond province. *Gornyi Zhurnal.* 2022;(7):12–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.02>
16. 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 редкометалльного оруденения на месторождении Томтор. *Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах*. Сборник научных трудов. М.;1995:223–241.
- Konoplev A.D., Tolstov A.V., Vasiliev A.T., Nechelyustov G.N., Kuzmin V.I., Sklyadneva V.M., Dubinchuk V.T., Konopleva E.V., Sidorenko G.A. Features of localization of rare-metal mineralization at the Tomtor deposit. *Rare-metal-uranium ore formation in sedimentary rocks*. Collection of scientific papers. Moscow;1995:223–241. (In Russ.)
17. Кравченко С.М., Беляков А.Ю., Кубышев А.И., Толстов А.В. Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды – новый тип редкометалльного сырья. *Геология рудных месторождений.* 1990;32(1):105–109.
- Kravchenko S.M., Belyakov A.Yu., Kubyshev A.I., Tolstov A.V. Scandium-rare earth-yttrium-niobium ores – a new type of rare metal raw materials. *Geology of Ore Deposits.* 1990;32(1):105–109. (In Russ.)
18. Толстов А.В., Лапин А.В., Похиленко Н.П., Овчинников К.В. Скандий и иттрий Томторского рудного поля. *Цветная металлургия.* 2015;(4):37–43.
- Tolstov A.V., Lapin A.V., Pokhilenko N.P., Ovchinnikov K.V. Scandium and yttrium of the Tomtorsky ore field. *Non-ferrous Metals.* 2015;(4):37–43. (In Russ.)
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 Сьюльдюкарского поля Якутии. *Руды и металлы.* 2021;(1):93–105. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10006>
- Ignatov P.A., Zaripov N.R., Tolstov A.V., Kolesnik A.Yu., Maltsev M.V. Hydrothermal mineralization in Cambrian sedimentary rocks as an indicator of the ore-containing structure of kimberlites of the Syuldyukar field of Yakutia. *Ores and metals.* 2021;(1):93–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10006>
20. Лапин А.В., Толстов А.В., Антонов А.В. Изотопный состав Sr- и Nd-кимберлитов и конвергентных с ними пород Сибирской платформы. *ДАН. Наука о Земле.* 2007;414(1):78–82.
- Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. SR and ND isotopic compositions of kimberlites and associated rocks of the Siberian Craton. *Doklady Earth Sciences.* 2007;414(1):557–560. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07040150>
21. Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites. *Geochemistry International.* 2007;45:1197–1209. <https://doi.org/10.1134/S0016702907120026>
22. Граханов О.С. *Строение, состав и условия формирования раннемезозойских погребенных россыпей алмазов Средне-Мархинского района Западной Якутии*: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Мирный; 2010. 24 с.
- Grakhanov O.S. *Structure, composition and conditions of formation of Early Mesozoic buried diamond placers of the Sredne-Markhinsky district of Western Yakutia*. Abstr. ...Diss. Cand.Sci., Novosibirsk; 2010. 24 p. (In Russ.)
23. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. *Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии*. Иркутск: Изд-во ИГТУ; 2008. 507 с.
- Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk: ISTU Publishing House; 2008. 507 p. (In Russ.)
24. Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Новиков К.В., Толстов А.В. Ареал брекчий щелочных базитов Накынского кимберлитового поля. *Известия вузов. Геология и разведка.* 2010;(2):31–35.
- Ignatov P.A., Bushkov K.Yu., Novikov K.V., Tolstov A.V. The area of breccias of alkaline basites of the

Nakyn kimberlite field. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2010;(2): 31–35. (In Russ.)

25. 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;23(1):97–104.

Kiselev A.I., Egorov K.N., Chernyshov R.A., Chashchukhin A.V., Yanygin Yu.T. The nature of basic explosive breccias within the Nakyn kimberlitic field (Yaku-

tian diamondiferous province). *Tikhookeanskaya Geologia*. 2004;23(1):97–104. (In Russ.)

26. Киселев А.И., Ярмолук В.В., Егоров К.Н. и др. Среднепалеозойский базитовый магматизм северо-западной части Вилюйского рифта: состав, источники, геодинамика. *Петрология*. 2006;14(6):626–648.

Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N. et al. Middle Paleozoic basal magmatism of the northwestern part of the Vilyui Rift: composition, sources, geodynamics. *Petrology*. 2006;14(6):588–608. <https://doi.org/10.1134/S0869591106060051>

#### *Об авторах*

ИГНАТОВ Петр Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Scopus AuthorID: 14624021100, AuthorID: 61399, e-mail: [petrignatov@gmail.com](mailto:petrignatov@gmail.com)

ЕРЕМЕНКО Руслан Умарович, аспирант, инженер-исследователь, e-mail: [eremenko-ruslan@mail.ru](mailto:eremenko-ruslan@mail.ru)

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, ResearcherID: O-2643-2013, e-mail: [tols61@mail.ru](mailto:tols61@mail.ru)

ОВЧИННИКОВ Илья Максимович, эксперт, AuthorID: 11356007, e-mail: [ovchinnikovim@alrosa.ru](mailto:ovchinnikovim@alrosa.ru)

#### *About the authors*

IGNATOV, Petr Alekseevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, Scopus AuthorID: 14624021100, AuthorID: 61399, e-mail: [petrignatov@gmail.com](mailto:petrignatov@gmail.com)

EREMENKO, Ruslan Umarovich, graduate student, e-mail: [eremenko-ruslan@mail.ru](mailto:eremenko-ruslan@mail.ru)

TOLSTOV, Alexander Vasilyevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, ResearcherID: O-2643-2013, e-mail: [tols61@mail.ru](mailto:tols61@mail.ru)

OVCHINNIKOV, Ilya Maksimovich, Expert, AuthorID: 11356007, e-mail: [ovchinnikovim@alrosa.ru](mailto:ovchinnikovim@alrosa.ru)

*Поступила в редакцию / Submitted 22.03.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 26.04.2023*

*Принята к публикации / Accepted 17.05.2023*