

УДК 553.493.67:553.81(571.56)

РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СКАНДИЯ В ДРЕВНЕЙ КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ В НАКЫНСКОМ КИМБЕРЛИТОВОМ ПОЛЕ ЯКУТИИ

© 2023 г. П. А. Игнатов^а, *, Р. У. Еременко^а, **, А. В. Толстов^б, ***, И. М. Овчинников^с

^аРоссийский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

^бИнститут геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, пр. Ленина, 39, Якутск, 677000 Россия

^сАкционерная компания «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

*E-mail: petrignatov@gmail.com

**E-mail: eremenko-ruslan@mail.ru

***E-mail: tols61@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2023 г.

После доработки 10.05.2023 г.

Принята к публикации 13.05.2023 г.

В Мало-Ботуобинском, Средне-Мархинском и Ыгыаттинском алмазоносных районах Западно-Якутской кимберлитовой провинции выявлены предпосылки и признаки скандиевых месторождений в древних корах выветривания, залегающих на породах нижнего палеозоя и связанных с зонами древнего пластового и грунтового окисления. По данным рентгенофлуоресцентных и ICP MS анализов, в Накынском кимберлитовом поле Средне-Мархинского алмазоносного района установлены перспективные рудопроявления и концентрационные ореолы скандия в глинистых отложениях переотложенных кор выветривания дяхтарской свиты поздне триасово-раннеюрского возраста. Они приурочены к эрозионной поверхности нижнепалеозойских карбонатных пород и прорывающих их среднепалеозойских траппов, монзонит-порфиров и кимберлитов; сверху перекрыты осадочным чехлом юрских терригенных отложений. Концентрационные аномалии скандия в глинах дяхтарской свиты локализованы преимущественно в делювиальных глинистых отложениях палеоводоразделов и тяготеют к узлам пересечения тектонических нарушений. Глубина их залегания не превышает 100 м, что вполне благоприятно для добычи скандия способом скважинного подземного выщелачивания. На одном из участков выявлены концентрации скандия до 262 г/т в поздне триасовой коре выветривания, включающие материал из дайки среднепалеозойского габбро, а также перекрывающих делювиальных глинах дяхтарской свиты с максимумом 462 г/т.

Ключевые слова: алмазоносные районы, базиты, зоны пластового окисления, кимберлиты, коры выветривания, месторождения, прогнозирование, рудопроявления, скандий, Якутия

DOI: 10.31857/S0016777023060059, **EDN:** SGTPMR

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время скандий является одним из самых дорогих и востребованных в современном производстве редких элементов. Его использование, очевидно, в ближайшие десятилетия будет неуклонно возрастать ввиду его востребованности в атомной, водородной и солнечной энергетике, производстве специальных прочных легких сплавов и керамики, самолетов, ракет, военной техники, электроники, лазерной техники, твердотопливных элементов. Высокая цена его, превышающая 1000 долл. США за 1 кг Sc₂O₃, определяется сложным процессом аффинажа и малотоннажным производством. Ранее авторами обоснована принципиальная вероятность обнаружения скандиевых месторождений в алмазоносных районах Западной Якутии (Игнатов и др., 2022). В данной

статье показана возможность попутного вовлечения в промышленное освоение проявлений скандия в непосредственной близости от объектов алмазодобычи в Западной Якутии.

Скандий – типичный рассеянный элемент; он извлекается попутно при добыче руд вольфрама, олова, кобальта, никеля, редких земель и урана, однако он может быть и главным компонентом руд, как, например, это имеет место в латеритах по ультрабазитам (Wang et al., 2021). Предпосылками наличия скандиевых месторождений в алмазоносных районах Якутии являются (Игнатов и др., 2022):

– широкое распространение потенциальных коренных источников скандия как базитофильного элемента среднепалеозойских и мезозойских траппов, а также монзонитов, кимберлитов и карбонатитов;

– широкое распространение кор выветривания позднедевонско-раннекаменноугольного и поздне-триасово-раннеюрского возраста (Зинчук, 1994);

– интенсивная миграция скандия при развитии древнего грунтового и пластового окисления и его осаждение на щелочном и сорбционном ба-рьерах в глинах отмеченных кор выветривания.

Вовлечению в эксплуатацию прогнозируемых месторождений благоприятствует возможность отработки скандиевых руд способом скважинного подземного серноокислотного выщелачивания, опыт которого имеется при добыче урановых руд в много-летнемерзлых породах (Добыча урана ..., 2022).

Эффективность поисковых работ на скандий в Западной Якутии обусловлена хорошей изученностью районов бурением на глубину до 100 м, что связано с проведением поисковых работ на алмазы с бурением колонковых скважин.

Ниже приведены данные по перспективным рудопоявлениям скандия в Накынском кимберлитовом поле Среднемархинского района Якутии. Здесь уже более двадцати лет с 2000 г. ведется разработка коренных и россыпных месторождений алмазов (Граханов, 2010; Проценко, 2020). Срок освоения алмазных месторождений открытым способом охватывает 30–60 лет. Время на поиски, оценку и разведку месторождений твердых полезных ископаемых оценивается от 5 до 15 лет. Следовательно, к периоду окончания эффективной карьерной добычи месторождений алмазов в Накынском поле будет целесообразно иметь подготовленные к освоению запасы нового для региона вида ценного минерального сырья – скандия.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Накынское кимберлитовое поле расположено в Среднемархинском районе Якутской алмазодобывающей провинции и вместе с другими полями локализовано внутри Вилюйско-Мархинской зоны разломов глубокого заложения северо-восточного простирания (фиг. 1). Среднепалеозойские силлы и дайки траппов, эруптивные брекчии базитов, монцонит-порфиры и позднедевонско-каменноугольные кимберлиты прорывают нижнепалеозойский терригенно-карбонатный платформенный чехол.

Выше эти образования фрагментарно перекрыты средне-позднетриасовыми корами выветривания; карбонатно-глинистыми отложениями дяхтарской свиты поздне-триасово-раннеюрского возраста, сложенными материалом переотложенных кор выветривания. Они представлены делювиальными, карстовыми, пролювиальными, аллювиальными и озерными отложениями (Граханов, 2010; Никулин, Савко, 2009). Выше

залегают повсеместно распространенные юрские мелководно-морские отложения (фиг. 2).

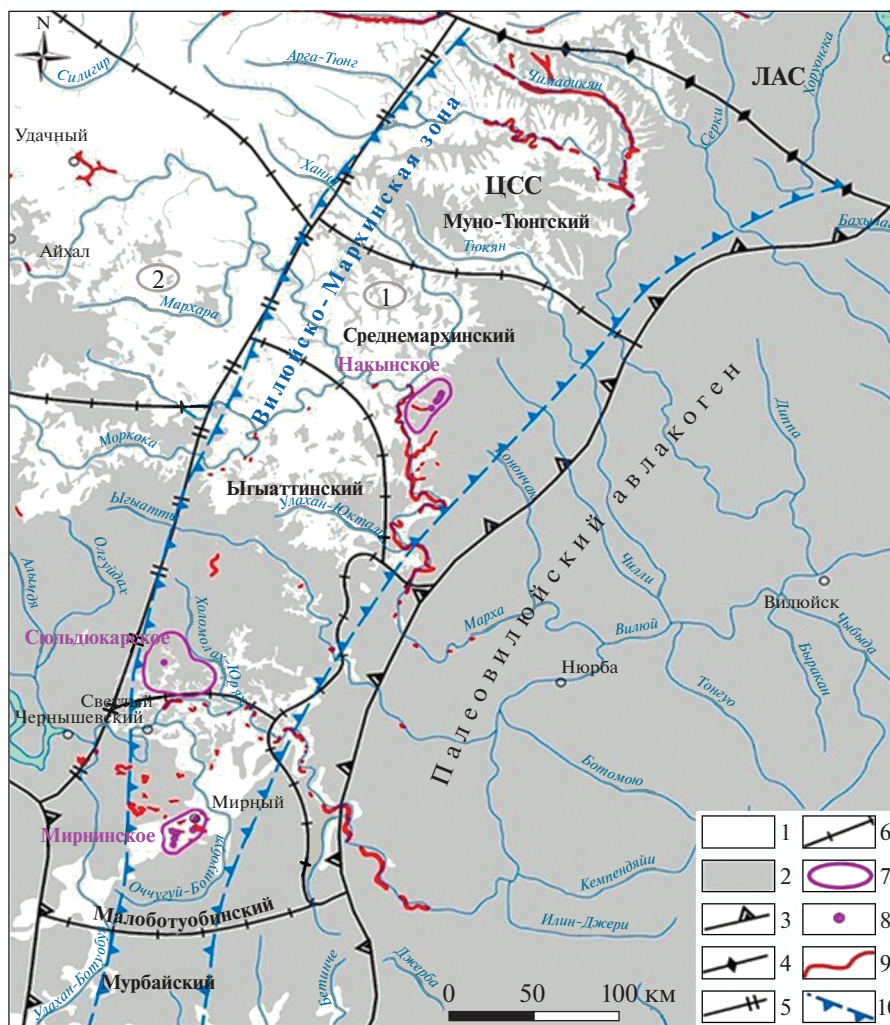
В Накынском поле находятся крупные россыпные и коренные месторождения алмазов: россыпь Нюрбинская, кимберлитовые трубки Ботуобинская, Нюрбинская и Майская. Здесь более 20 лет ведется эффективная добыча алмазов открытым способом. Центральная часть поля хорошо опробована бурением, пройдено много разведочных и оценочных вертикальных и наклонных скважин при весьма высоком выходе керна практически во всех скважинах. На флангах поля поисковая сеть существенно разрежена и может быть представлена единичными скважинами.

По многим скважинам проведено штучное литогеохимическое опробование с целью возможного выявления маломощных проявлений кимберлитов или минералов-индикаторов кимберлитов. Создана обширная аналитическая база в виде результатов корректных рентгенофлуоресцентных определений, включающая более 46 тысяч анализов. Опробованию подвергались все элементы стратиграфического разреза: кембрийские и ордовикские терригенно-карбонатные породы, среднепалеозойские силлы, дайки и эруптивные брекчии базитов, монцонит-порфиры и кимберлиты; образования доюрской коры выветривания, отложения дяхтарской свиты поздне-триасово-раннеюрского возраста, перекрывающие мелководно-морские отложения юры. Эти данные обработаны статистически. Выполнен историко-геологический анализ с целью прогноза месторождений скандия, связанных с древними корами выветривания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что содержания скандия в качестве попутного компонента в рудах других металлов колеблются от 41 до 100 г/т и более (Wang et al., 2021; Williams-Jones, Vasyukov, 2018). На гигантском редкометальном месторождении Томтор, в карбонатитах и развитых по ним корам выветривания, средние содержания скандия составляют 200 г/т, в промышленных рудах – 500 г/т (Быховский и др., 2016; Lapin and at., 2016; Толстов и др., 2015). В этой связи за условное минимально-промышленное содержание скандия можно принять величину $C_{Sc} = 100$ г/т при кларке в глинистых породах 12 г/т и базитах – 24 г/т.

В Накынском кимберлитовом поле проанализировано распределение скандия и ряда других элементов по 46763 рентгенофлуоресцентным анализам (РФА). Из них в 48 пробах содержание скандия превысило 100 г/т, в том числе в карбонатных породах нижнего палеозоя 8 проб, в триасовых корам выветривания – 5 и в породах дяхтарской свиты – 27. Высокие содержания скандия по результатам ICP MS анализов определены



Фиг. 1. Обзорная схема Вилюйско-Мархинской зоны с элементами минерагенического районирования (Проценко, 2020). 1–2 – типы поисковых площадей: 1 – открытые для поисков, 2 – закрытые для поисков; 3–7 – границы разно-ранговых алмазоносных таксонов: 3 – Якутской алмазоносной провинции, 4 – субпровинций (ЦСС – Центрально-Сибирская, ЛАС – Лено-Анабарская), 5 – алмазоносных областей (1 – Вилюйско-Мархинская, 2 – Верхневиллюйская), 6 – алмазоносных районов (и их названия), 7 – продуктивных кимберлитовых полей (и их названия); 8 – алмазоносные кимберлиты; 9 – россыпи и россыпепроявления алмазов; 10 – Вилюйско-Мархинская зона разломов.

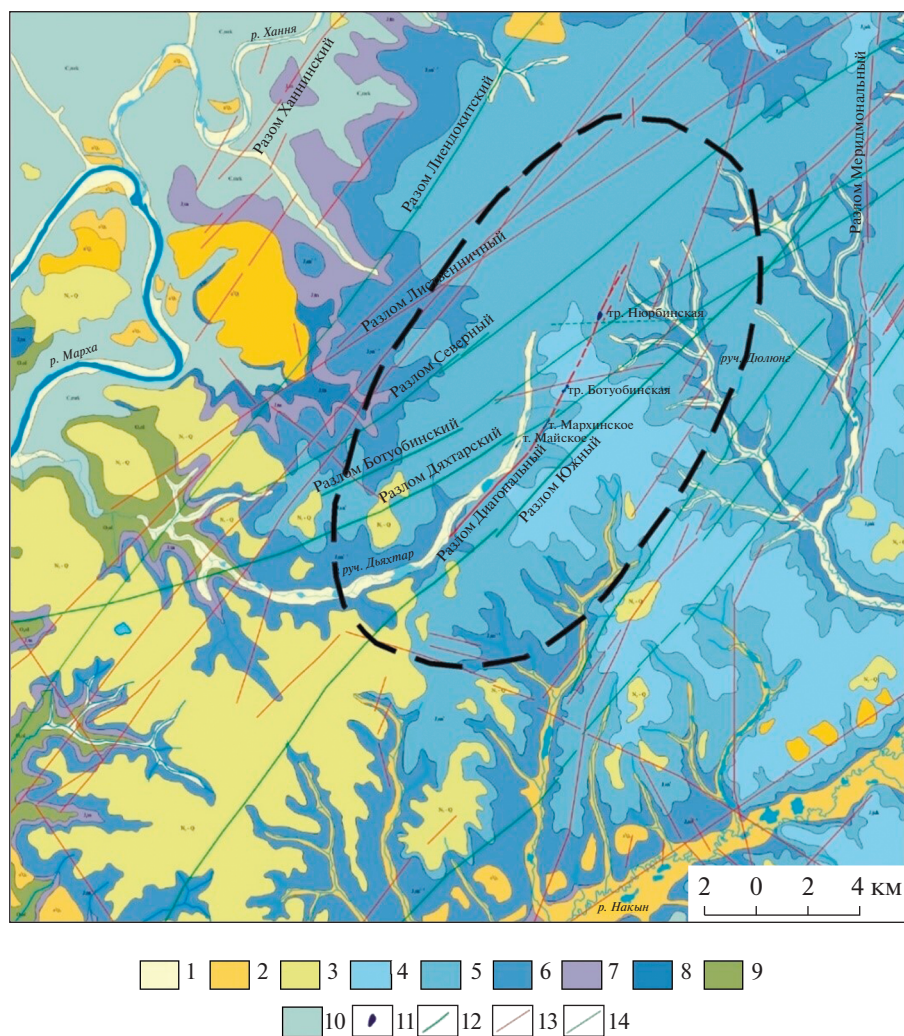
в ряде проб, отобранных из магматических пород Накынского поля (Киселев и др., 2004). Так, в до-кимберлитовых дайках базитов из 11 анализов в двух пробах содержание скандия составило (г/т) 331 и 400, в силах в 3 из 4 анализов – 369, 372 и 407; в посткимберлитовых базитах трубки Нюрбинская из 12 проб в 5 случаях – 366, 423, 424, 431, 437, 480; в монцит-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 (фиг. 3). Эти тела базитов могли быть локальными источниками повышен-

ных концентраций скандия при формировании по ним кор выветривания.

По РФА анализам 9808 проб, взятых из пород дяхтарской толщи 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 толще представлено глинами. В табл. 1 приведены результаты анализов, где содержание скандия в дяхтарской толще превышает 100 г/т.

Дяхтарская толща сложена преимущественно глинистым материалом монтмориллонит-гидро-слюдистого состава с обломками подстилающих карбонатных пород – осадками ближнего сноса и переотложения материала кор выветривания (Никулин, Савко, 2000; Граханов, 2010). В ее раз-

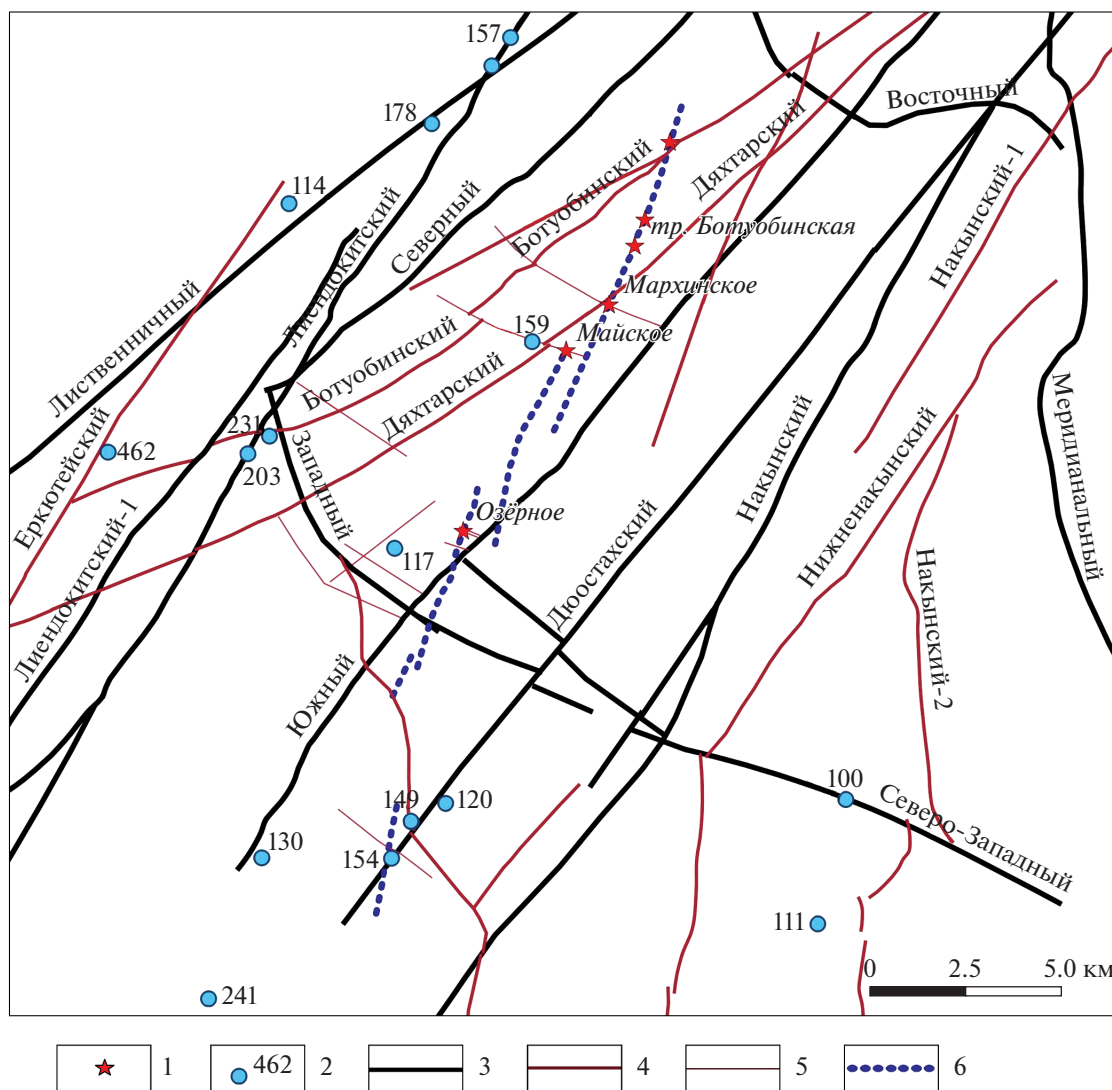


Фиг. 2. Геологическая карта Накынского поля (Никулин и др., 2009). 1 – четвертичные отложения (Q_{IV}); 2 – аллювиальные четвертичные (a_2Q_{II} и a_3Q_I); 3 – неоген-четвертичные (N_2-Q); 4 – якутская свита (J_{2jak}); 5 – сунтарская свита, верхняя пачка (J_{1sn4}); 6 – сунтарская свита, нижние пачки (J_{1sn1-3}); 7 – тюнгская свита (J_{1tn}); 8 – укугутская свита (J_{1uk}); 9 – олдондинская свита (O_{1ol}); 10 – мархинская свита (E_3mrh). Среднепалеозойские интрузивные образования: 11 – кимберлитовые тела (iPZ_2); 12 – дайковые тела основного состава ($v\beta PZ_2$); 13 – разрывные нарушения; 14 – разломы, выполненные дайками основных пород. Пунктиром показан контур Накынского поля (Костровицкий и др., 2015)

разреза преобладают существенно глинистые породы и выделены следующие типы отложения (Никулин, Савко, 2009; Граханов, 2010): русловые, в том числе конусов выноса и внутрикарстовых временных водотоков; делювиальные – пологих склонов и их подножий; проточных озер; застойных, часто зарастающих вторичных водоемов 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 (Никулин, Савко, 2009). Эти факты указывают на процессы древнего грунтового окисления.

В центральной части Накынского кимберлитового поля закартированы Дюлюнг-Дяхтарская и Уолбинская депрессии дяхтарского времени. В Дюлюнг-Дяхтарской впадине сосредоточены крупная Нюрбинская алмазная палеороссыпь и коренные месторождения и рудопроявления алмазов (Граханов и др., 2007). 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 63 до 85.5 м и по большей части представлены глинами.

В целом в Накыском кимберлитовом поле скважины, вскрывшие в дяхтарской толще повышенные концентрации скандия, расположены в



Фиг. 3. Положение концентрационных аномалий скандия в разломных структурах Накынского поля. 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.

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 (фиг. 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, Ботуббинского 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 (фиг. 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 Накыньском поле и узлах их пересечения с другими нарушениями сосредоточены трубки взрыва щелочно-базитового состава (Киселев и др., 2004 и др.).

Ореол повышенных концентраций скандия вытянут вдоль Дюостахского нарушения. Его длина до 3 км и ширина до 1.5 км определяет возможность прогнозирования здесь месторождения скандия. Следует отметить его асимметрию. На северо-запад концентрации скандия уменьшаются плавно, на юго-восток – резко. Это можно свя-

Таблица 1. Аномальные концентрации скандия (выше 100 г/т) в породах дяхтарской толщи 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
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. Анализы выполнены в ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО)

зять с более пологим палеорельефом к северо-западу от дайки габбро-долеритов, выполняющей Дюостахский разлом. В разрезе дяхтарской толщи концентрации скандия ассоциируются с заметными повышенными концентрациями ванадия, кобальта, никеля, лантана и церия (фиг. 6).

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 (фиг. 7).

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 (фиг. 8).

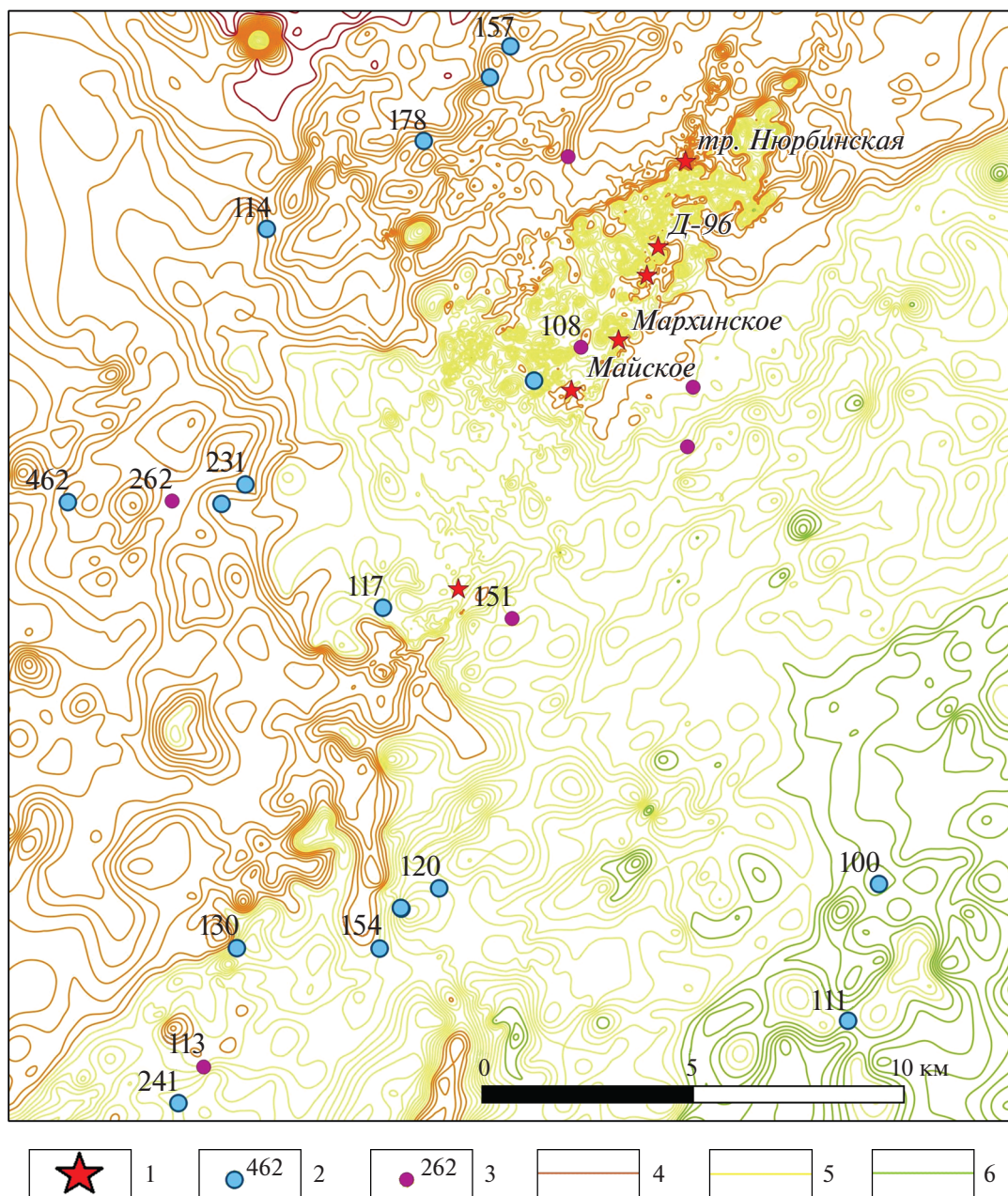
То есть на данном участке отмечаются повышенные концентрации скандия как *in situ*, так и в переотложенной коре выветривания. При этом ширина ореола концентраций скандия выше 100 г/т

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 (Кравченко и др., 1990; Лапин и др., 1991; Коноплев и др., 1995; Лапин, 1995; Lapin and al., 2016; Толстов и др., 2015).

ОБСУЖДЕНИЕ

В зону гипергенеза скандий поступает, освобождаясь, главным образом, из железомagneзических минералов, особенно из пироксенов и амфиболов, и активно сорбируется глинистыми минералами монтмориллонитовой и каолинитовой группы и гидроксидами железа (Wang et al., 2021). 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 (Янин, 2007). Его вынос из элювия не превышает 30–35% от исходного содержания в субстрате. Обычно вверх по разрезу коры выветривания возрастают как общее содержание скан-

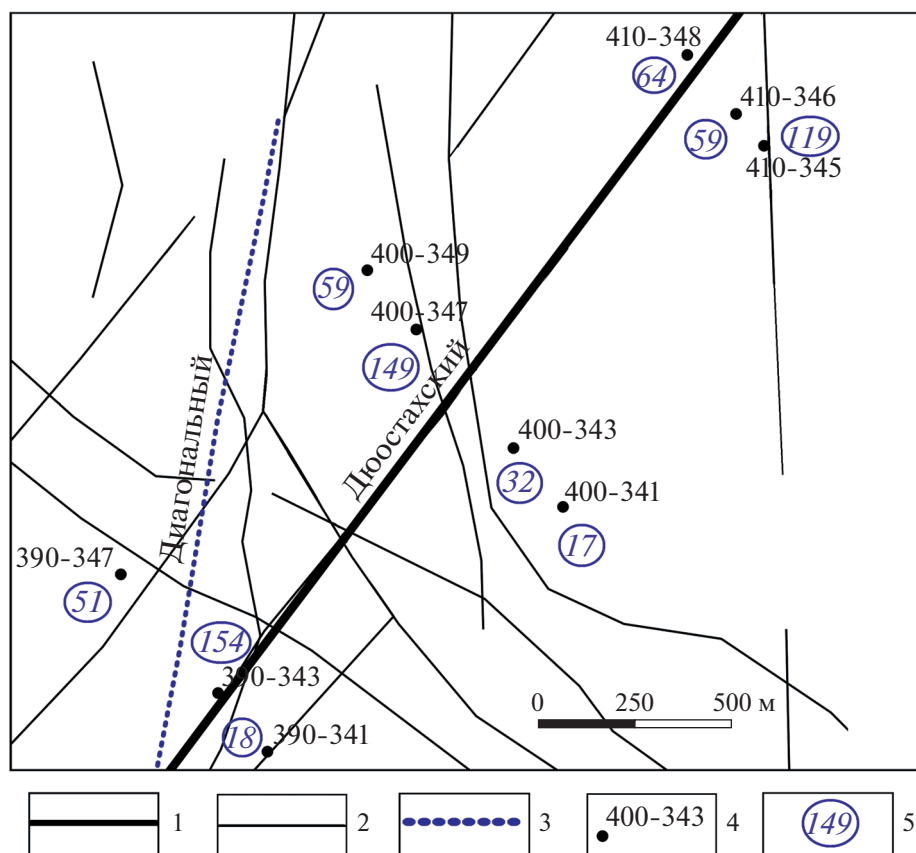


Фиг. 4. Локализация проб с повышенными концентрациями скандия в дяхтарской толще и триасовой коре выветривания в обрамлении линейных кустов алмазоносных кимберлитов Накынского поля на фрагменте карты стратозоигипс кровли нижнего палеозоя (по данным ВГРЭ). 1 – известные кимберлитовые тела; 2–3 – содержания Sc выше 100 г/т: 2 – в дяхтарской толще, 3 – в отложениях коры выветривания T₂₋₃; 4–6 – значения стратозоигипс кровли нижнего палеозоя: 4 – 162–216 м, 5 – 108–162 м, 6 – 54–108 м.

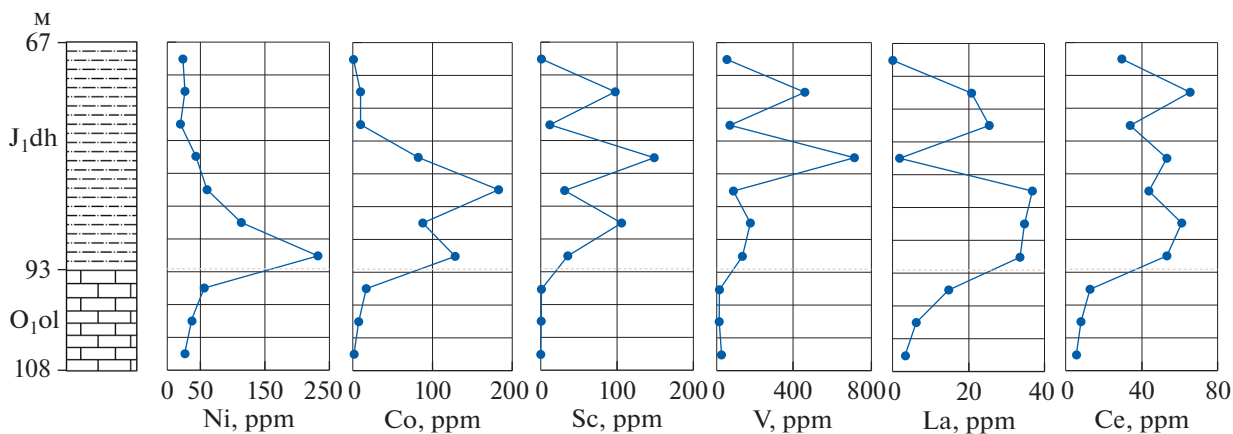
дия, так и его содержание в глинистой фракции. С другой стороны, имеются факты о дальнейшем переносе Sc и его соосаждении вместе с ураном, что показано на примере урановых месторождений Хиагдинского урановорудного поля Витимского плато (Добыча урана..., 2022).

В связи с установленными нами повышенными концентрациями Ni, Co, Sc, V, La и Ce в разрезе дяхтарской толщи, надо отметить, что ано-

мальные концентрации названных элементов характерны и для рудопроявления скандия в коре выветривания позднедевонско-раннекаменноугольного возраста, развитой по кимберлитам Сюльдюкарского поля (Игнатов и др., 2022), а также в месторождениях скандия в латеритах по ультрабазитам в Австралии и Новой Каледонии (Быховский и др., 2019; Teitler et al., 2019; Chasse et al., 2017). В них совместно со скандием отме-



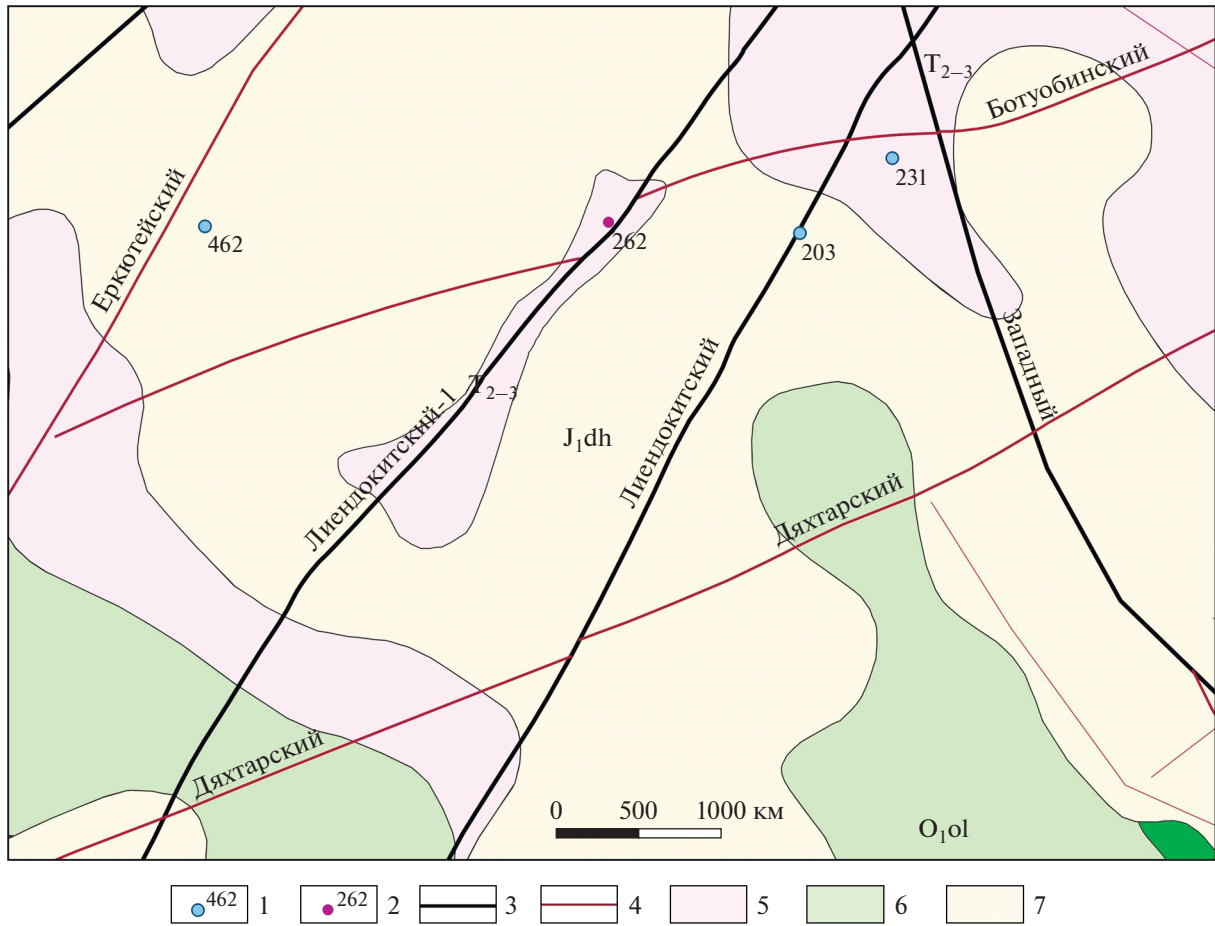
Фиг. 5. Рудопроявление скандия в глинах дяктарской толщи в узле пересечения Западного, Дюостакского и Диагонального разломов Накынского поля с условным центром у скв. 400-347. 1 – осевая зона Дюостакского разлома, 2 – разломы второго порядка, 3 – фрагмент Диагонального кимберлитоконтролирующего разлома,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



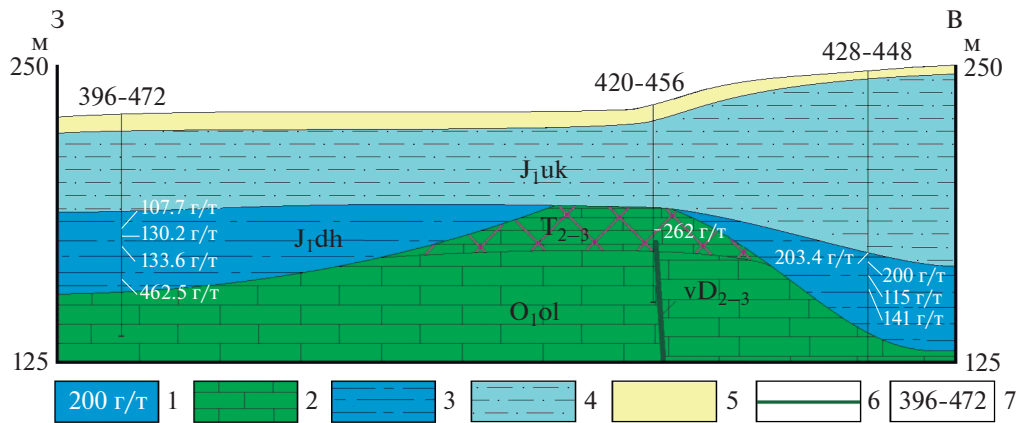
Фиг. 6. Распределение Ni, Co, Sc, V, La, Ce по скважине 400–347 (результаты РФА по пробам, отобранными геологами ВГРЭ), вскрывающей разрез коры выветривания в центральной части рудопоявления скандия в Накыньском поле. O_{1ol} – известняки олдондинской свиты нижнего ордовика, J_{1dh} – преимущественно глинистые отложения дяктарской толщи нижней юры.

чены 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 рудопоявления.

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 накопи-



Фиг. 7. Концентрации скандия на литолого-фациальной схеме отложений подошвенных горизонтов джартарской толщи и коры выветривания (по данным ВГРЭ). 1–2 – содержания Sc выше 100 г/т: 1 – в джартарской 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 джартарское время: 5 – кора выветривания T_{2-3} , 6 – карбонатные породы ордовика, 7 – делювиальные отложения джартарской толщи.



Фиг. 8. Широтный геологический профиль по линии скважин 396-472–420-456–428-448 участка с концентрациями скандия Накынского кимберлитового поля. Отношение вертикального и горизонтального масштабов 1 : 250; 1 – содержание скандия в г/т; 2 – известняки олондинской свиты; 3 – глины джартарской толщи; 4 – алевриты и алевропесчаники укугутской свиты; 5 – четвертичные отложения; 6 – дайка девонских долеритов; 7 – номер скважины. Штриховкой показана захороненная кора выветривания.

вались 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 ближайшем переотложении; в позднетриасово-раннеюрское время — при инфильтрации агрессивных по отношению к скандию сульфатных окислительных грунтовых вод и его осаждении в глинах на щелочно-сорбционном барьере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе многочисленных данных рентгенофлуоресцентных анализов, частично продублированных ICP MS методами, в Накынском кимберлитовом поле Якутии выявлены перспективные рудопоявления скандия с содержаниями выше 100, достигающими максимума 462.5 г/т.

Повышенные концентрации скандия локализованы в глинах позднетриасово-раннеюрской дяхтарской толщи, представленных материалом переотложенных кор выветривания. Они залегают на глубинах до 90 м и перекрыты морскими отложениями юрского возраста. Особенно важно, что выделенные участки расположены на ближних флангах Накынского кимберлитового поля, в пределах которого осуществляется промышленное освоение коренных месторождений алмазов, а повышенные концентрации скандия сосредоточены во вскрышных отложениях. Именно эти участки могут оказаться экономически ценными месторождениями, поскольку высокие концентрации скандия расположены непосредственно в пределах действующего промышленного предприятия.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного фонда (грант № 23-27-00280).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Быховский Л.З., Потанин С.Ж., Котельников Е.И., Ануфриева К.И. и др. Редкоземельное и скандиевое сырье России // Минеральное сырье. М.: ВИМС, 2018. № 31. С. 216 с.

Граханов О.С. Строение, состав и условия формирования раннемезозойских погребенных россыпей алмазов Средне-Мархинского района Западной Якутии: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Мирный, 2010. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне. Под ред. И.Н. Солодова. М. ZetaPrint, 2022. 183 с.

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

Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазоносной провинции // Горный журн. 2022. № 7. С. 12–21.

Киселев А.И., Егоров К.Н., Чернышов Р.А., Чащухин А.В., Яныгин Ю.Т. Проявления флюидно-взрывной дезин-

теграции базитов в Накынском кимберлитовом поле (Якутская алмазоносная провинция) // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 1. С. 97–104.

Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелюстов Г.Н., Кузьмин В.И., Скляднева 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. научных трудов. М., 1995. С. 223–241.

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

Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080–1115.

Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология рудн. месторождений. 1991. Т. 33. № 4. С. 81–91.

Никулин И.И., Савко А.Д. Литология алмазоносных нижнеюрских отложений Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Тр. НИИ геологии ВГУ. Воронеж: Воронежский государственный ун-т, 2009. № 56. 134 с.

Проценко Е.В. Структурно-тектонические закономерности локализации алмазоносных кимберлитовых полей в пределах Вилуйско-Мархинской минерагенической зоны (Западная Якутия): автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ЦНИГРИ, 2020.

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.

Янин Е.П. Скандий в окружающей среде (распространенность, техногенные источники, вторичные ресурсы) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2007. № 8. С. 70–90.

Chasse M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Calas G. Scandium specciation in a world-class lateritic deposit // Geochem. Perspect. Lett. 2017. V. 3. P. 105–114.

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. T. 54. № 12. P. 1061–1078.

Teitler Y., Cathelineau M., Ulrich M., Ambrosic J.P., Munoz M., Sevine B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites // J. Geochemical Exploration. 2019. V. 196. P. 131–155.

Wang Zhenchao, Li Yan Hei Martin, Liu Ray Ze-Rui, Zhu U. Mei-Fu Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration // Ore Geol. Rev. 2021. V. 128. Paper 103906. P. 1–15.

Williams-Jones A.E., Vasyukov O.V. The Economic Geology of Scandium, the Runt of the Rare Earth Element Litter // Econ. Geol. 2018. V. 113. № 4. P. 973–988.