

Эпигенетические изменения в кембрийских и пермских осадочных породах в Мало-Ботуобинском районе Якутии

Аннотация. Рассмотрено геологическое строение и стратиграфические подразделения на поисковой площади Бестях на севере известного Мало-Ботуобинского алмазоносного района Якутии. На основании изучения 238 разрезов поисковых скважин выделены зоны эпигенетического пластового и трещинного окисления. Прослежены полосы выклинивания таких зон, соответственно пластовых в угленосных пермских отложениях, трещинных в битуминозных терригенно-карбонатных породах кембрия. В кембрийской толще установлены меридиональные, вытянутые вдоль разломов полосы проявлений прожилкового битума, которые не только являются прямым признаком вероятных месторождений углеводородов, но и представляют собой объёмную восстановительную среду, благоприятную для осаждения стратегических редких элементов. В зонах выклинивания пластового и трещинного окисления предполагаются концентрации ванадия, скандия и рения.

Ключевые слова: осадочные породы, зоны пластового окисления, битумы, скандий.

ИГНАТОВ ПЁТР АЛЕКСЕЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии месторождений полезных ископаемых¹, ignatovpa@mgru.ru

ЕРЕМЕНКО РУСЛАН УМАРОВИЧ, аспирант, инженер-исследователь кафедры геологии месторождений полезных ископаемых¹, eremenko-ruslan@mail.ru

ТОЛСТОВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник², tols61@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ, руководитель проекта³, Vasilev_ap@alrosa.ru

ОВЧИННИКОВ ИЛЬЯ МАКСИМОВИЧ, эксперт Управления планирования производства³, ovchinnikovilm@alrosa.ru

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», г. Москва

² Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

³ АК «Алроса» (ПАО), г. Мирный

Epigenetic transformations in the Cambrian and Permian sedimentary rocks in the Malo-Botuobinsky district of Yakutia

P. A. IGNATOV¹, R. U. EREMENKO¹, A. V. TOLSTOV², A. P. VASILIEV³, I. M. OVCHINNIKOV³

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University", Moscow

² Institute of Diamond and Precious Metals Geology SB RAS, Yakutsk

³ JSC "Alrosa", Mirny

Annotation. The article considers the geological structure and stratigraphic units in the Bestyakh prospecting area in the north of the well-known Malo-Botuobinsky diamondiferous district of Yakutia, based on the study of 238 sections of prospecting drillholes. Zones of bedded and fractured epigenetic oxidation have been identified. Bands of wedging-out of such zones have been traced, that are bedded type in coal-bearing Permian deposits and fractured in bituminous terrigenous-carbonate rocks of the Cambrian, respectively. In the Cambrian sequence, meridional bands of manifestations of veined bitumen, stretched along the faults, have been revealed, which are not only a direct sign of probable hydrocarbon deposits, but they also represent a voluminous reducing environment favorable for precipitation of strategic rare elements. Concentrations of vanadium, scandium, and rhenium are assumed to be confined to the wedging-out zones of bedded and fractured oxidation.

Key words: sedimentary rocks, bedded oxidation zones, bitumen.

Введение. Мало-Ботуобинский район Западной Якутии хорошо изучен [3, 17, 22]. Кроме коренных и россыпных месторождений алмазов, здесь осваивается Иреляхское месторождение газа [1, 21], имеются проявления нефти, бурого угля и металлоносных рассолов [5]. Обоснованы перспективы обнаружения этих месторождений, а также скандия и других видов минерального сырья [10, 11]. Добыча таковых в условиях вечной мерзлоты возможна и проводится в настоящий момент [4].

Ниже приведены результаты картирования зон пластового и пластово-трещинного окислений, распространённых в породах верхнего кембрия и перми в пределах поисковой площади Бестях на севере Мало-Ботуобинского района. Здесь, как и по всей западной Якутии, широко распространены горизонтально залегающие терригенные угленосные отложения перми. Они с несогласием перекрывают терригенно-карбонатные морские отложения раннего палеозоя, включающие силлы и дайки среднепалеозойских траппов, тела кимберлитов, эруптивных брекчий базитов и монцонит-порфиоров. Пермские отложения часто вмещают силлы триасовых траппов и перекрыты юрскими угленосными континентальными отложениями.

Фактический материал и методы исследований. Для анализа использованы данные специальной авторской документации [13] и изучения керна поисковых скважин, вскрывших разрезы осадочного чехла до глубин порядка 100 м. Поисковая площадь Бестях, Мало-Ботуобинского района занимает меридиональную полосу 3×9 км и находится приблизительно в 30 км на север от города Мирный. Изучен керн 238 скважин, пройденных Вилюйской ГРЭ по поисковой сети 500×500 и 250×250 м. Все факты с картогра-

фической основой введены в составленную авторами базу данных, по которой создан геоинформационный проект в среде Quantum GIS (QGIS).

Пробы отбирались из пермских отложений. Содержание элементов корректно определены методами ИСП-АЭС, которые используются в практике работ Вилюйской ГРЭ [15]. Анализы выполнены в её центральной аналитической лаборатории на приборе iCAP 6300Duo производителя Thermo Scientific (США) по методике БГРЭ-МП5 мод III категории точности.

Геологическое строение. Кристаллический фундамент Мало-Ботуобинского района представлен метаморфическими породами архея. Осадочный чехол, мощностью порядка 3500 м, сложен вендскими, кембрийскими, ордовикскими, силурийскими, каменноугольными, пермскими, юрскими и четвертичными отложениями.

Самые древние породы, вскрытые поисковым бурением, – верхние горизонты холомолохской свиты верхнего кембрия, представленные красноватыми и сероцветными глинистыми, известковистыми доломитовыми алевролитами, известняками и доломитами [6]. Проявления зон пластового окисления прослежены только в породах каменноугольного и пермского возраста.

Минералогические, литолого-фациальные характеристики и палеогеографические условия накопления карбон-пермских отложений Западной Якутии хорошо изучены и опубликованы в работах В.П. Афанасьева, И.И. Антипина, Е.Н. Белова, Н.Н. Зинчука, Б.А. Калмыкова, И.Г. Коробкова, М.В. Куликова, С.Ф. Павлова, В.Г. Подвысоцкого, О.Г. Салтыкова, В.Н. Устинова, Ю.М. Эринчека и др.

Ботуобинская свита ($C_{2-3}bt$) сложена гравийно-галечными, песчаными и глинисто-алевролитовыми

выми породами первично серого цвета. Преобладают песчаники. В составе терригенного материала преобладают кварциты, кварц, кремнистые породы, встречается галька щелочных порфиров. Состав их преимущественно кварц-полевошпатовый. Среди минералов лёгкой фракции преобладает кварц (46 %), полевые шпаты составляют 17 %, плагиоклазы и слюды не превышают 15 %. В группе минералов тяжёлой фракции распространены эпидот (26 %), ильменит и магнетит (20 %), гранат (24 %), лейкоксен (9 %), турмалин (3 %).

Алевритовые породы слагают верхнюю часть разреза свиты. Цвет пород тёмно-серый, серый, иногда светло-серый и коричнево-серый. Обломочный материал алевритов представлен кварцем и полевым шпатом, в меньшей степени кремнями, присутствует тонкий углефицированный детрит. Цементирующая масса сложена глинисто-карбонатным и глинистым материалом. Глинистые минералы представлены смектитом (50–60 %), каолинитом (15–25 %) и иллитом (10–20 %), в подчинённом количестве присутствует хлорит (до 10 %).

Ахтарандинская свита (P₁ah) представлена серыми и голубовато-серыми кварц-полевошпатовыми песчаниками и тёмно-серыми горизонтально-слоистыми углистыми алевритовыми породами со слоями углистых глин. Свита содержит богатый комплекс отпечатков флоры. В тяжёлой фракции встречаются ильменит, альмандин, эпидот, турмалин, сфен, пироп и пикроильменит, единичные находки алмаза.

Боруллойдская свита (P₂br) сложена серыми песчаниками, песками, алевритовыми породами с прослоями бурых углей. Пески и песчаники – полевошпатово-кварцевые крупнозернистые, реже средне-мелкозернистые с рассеянной примесью гравийных зёрен, с мелкой и средней галькой кварца, кремней, средних и кислых эффузивов. Алевриты менее распространены. В разрезах преобладает горизонтальная, полого-наклонная косая однонаправленная слоистость. Присутствует углефицированный детрит. Связующая масса сложена слюдисто-глинистым материалом. Минеральный состав тяжёлой фракции близок подстилающим породам.

В боруллойдской свите встречаются прослои пирокластических туфов основного состава. На западе есть участки, сложенные грубозернистыми

туфами базальтового состава чичиканской свиты нижнего триаса, залегающими на породах нижнего палеозоя.

На большей части площади Бестях в карбон-пермской толще распространены силлы габбро-долеритов триасового возраста, достигающие ста и более метров.

На востоке площади имеются перекрывающие юрские отложения укугутской и оруктахской свит. *Укугутская свита (J_{uk})* сложена аллювиальными песками с прослоями гравийно-галечных конгломератов, глинистыми алевритовыми и аргиллитами, иногда с прослоями углей. Среди обломочного материала наряду с кварцем значительную роль играют разноокрашенные кремни, иногда отмечаются обломки окремнённой древесины и в различной степени выветрелые породы трапповой формации. Отмечаются горизонтальная, полого-наклонная, линзовидно-волнистая слоистость, подчёркиваемые гранулометрией, цветовыми оттенками и скоплениями детрита. *Оруктахская свита (J_{or})* представлена русловыми, пойменными и озёрно-болотными кварцевыми песками, глинистыми и углистыми алевритовыми породами.

Полученные результаты. На рассматриваемой площади в породах нижнего палеозоя установлены признаки восстановительного эпигенеза. Они выражены в проявлениях битумов и прожилковом осветлении пород холмолохской свиты кембрия. Битумы найдены в сероцветных породах карбонатного состава. Они, как правило, чёрно-серого цвета, матовые, но встречаются и блестящие, типа оксикерита.

Проявления битумов сопровождаются сорбированными углеводородными газами с резким запахом свежего асфальта, выделяющиеся при раскалывании породы. Проявления углеводородов в разрезах кембрия выражаются и в прожилках осветления, которые пересекают первично красные карбонатно-глинистые породы верхнего кембрия. Такое осветление распространено в алмазоносных районах Якутии и Архангельской области, маркирует разломы и отражает привнос углеводородных газов в породы нижнего палеозоя и вынос железа (осветление пород) [12].

На данной поисковой площади проведено детальное картирование вторичных битумов, распространённых в кембрии. Установлены узкие, до нескольких сотен метров, и протяжённые до 2,5 км

меридиональные ореолы (рис. 1). Они сопровождаются точечными проявлениями битумов, объединёнными в линзовидные ореолы. Линейная битуминизация локализована вдоль разломов, входящих в региональный Вилуйско-Мархинский среднепалеозойский дайковый пояс.

В битумах могут быть высокие концентрации ванадия и редких элементов, характерные для вязких нефтей [23]. В одной из двух проб глинистых доломитов кембрия, с выделениями битумов около 20 %, по данным ИСП-МС в лаборатории ВИМСа, установлены содержания вана-

дия 178 г/т (9 кларков концентрации карбонатных пород), урана – 7,2 г/т (3 кларка концентрации карбонатных пород), скандия – 14 г/т (14 кларков концентрации карбонатных пород). Проявления углеводородов представляют собой объёмную восстановительную среду, благоприятную для осаждения редких элементов при окислительно-восстановительных процессах.

В терригенных угленосных породах перми на рассматриваемой площади встречены проявления эпигенетического пластового окисления, закономерно сопровождаемые осветлением серо-

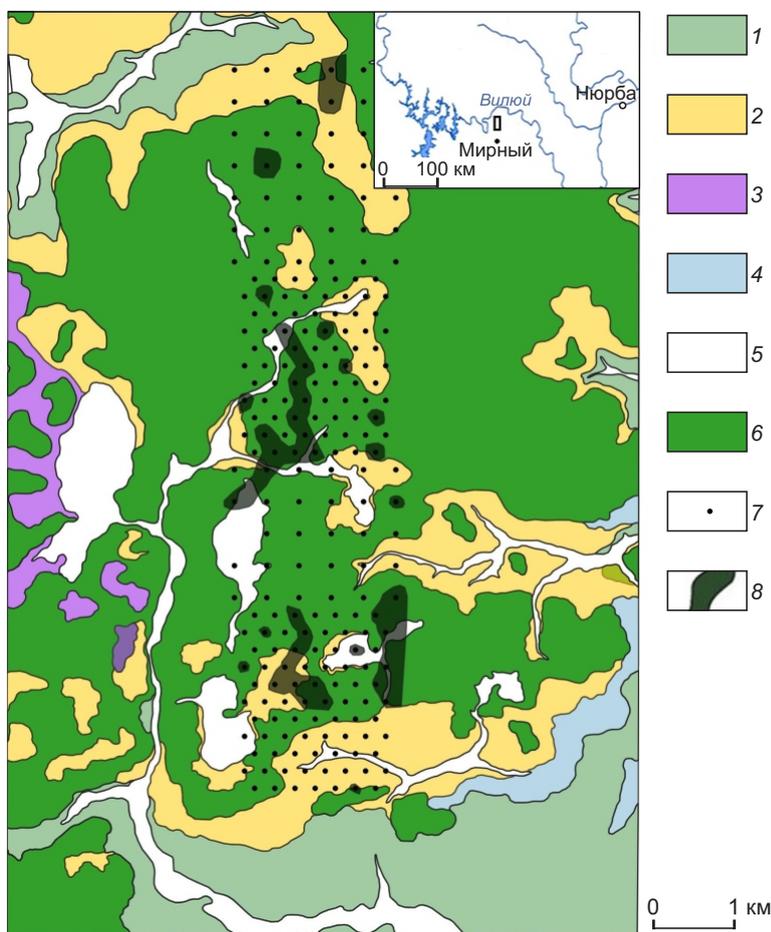


Рис. 1. Геологическая схема и ореолы прожилково-вкрапленных битумов в породах кембрия на площади Бестях Мало-Ботубинского района:

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; 8 – ореолы прожилково-вкрапленных битумов в породах холомолохской свиты

цветных песчаников (рис. 2, А). Данное осветление, по-видимому, обусловлено окислением углестого органического вещества, распространённого в песчаных породах перми в виде тонкого детрита. Встречаются разрезы, в которых непосредственно контактируют окисленные лимонитизированные песчанки и бурые угли (см. рис. 2, Б, В). В таких местах предполагаются концентрации редких элементов в углях на контрастном восстановительном и сорбционном барьере.

Данные ИСП-АЭС двух проб на контакте угля и лимонитизированного песчаника (см. рис. 2, В) подтверждают это (табл. 1). В угле обнаружены

концентрации, превышающие кларковые (в г/т): скандия – 20, ванадия – 276, иттрия – 147, редких земель, особенно неодима – 121 и церия – 214. Их 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.

В сероцветных песчаниках перми надо отметить заметные концентрации ряда элементов относительно кларка: ванадия – в 2 раза, молибдена –

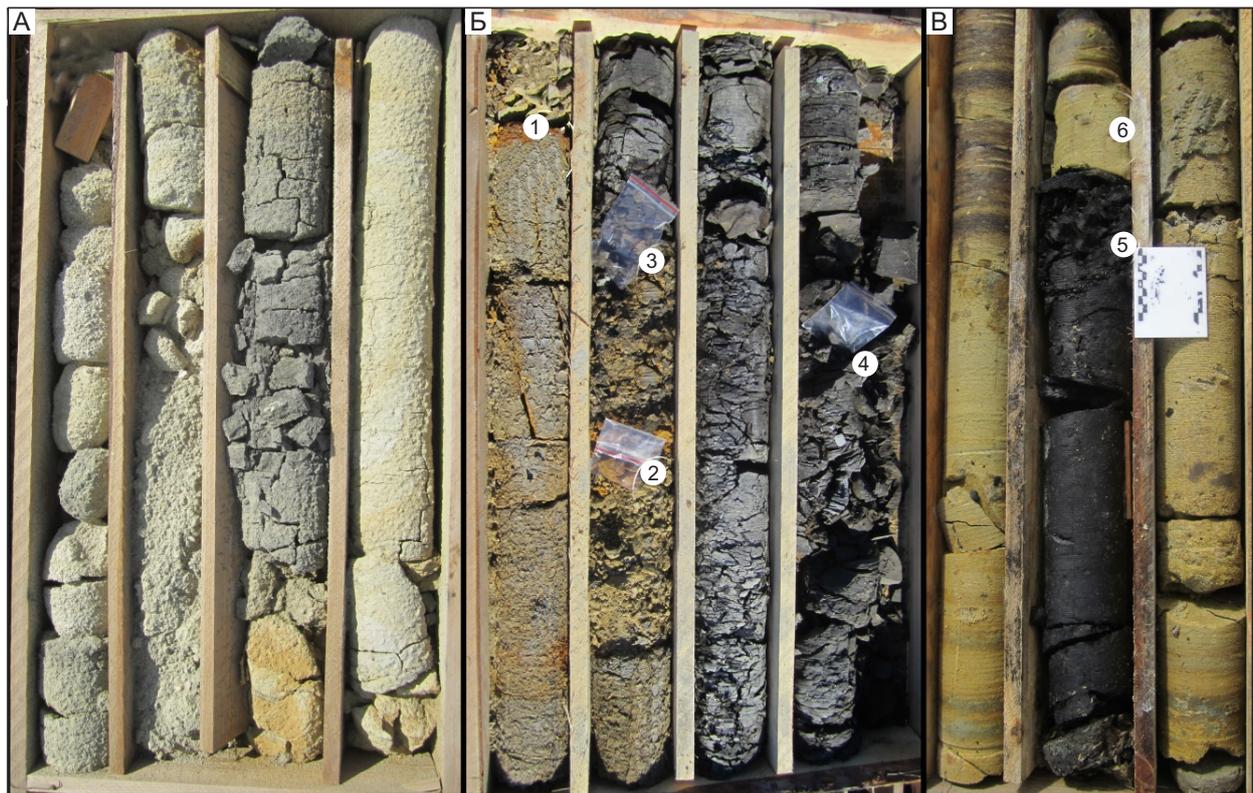


Рис. 2. Фрагменты разрезов пермских отложений по керну со 100 % выхода с ярко выраженной контрастностью внутрипластового окисления:

А – фрагмент серого углестого песчаника в окисленных, лимонитизированных и осветлённых песчаниках; скважина № 60.8-117.2, интервал 52–56 м; Б – контакт мелкозернистых лимонитизированных песчаников и углестого 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 ИСП анализа (см. табл. 1)

Табл. 1. Результаты ICP анализов (в г/т) керновых проб, отобранных из фрагментов разрезов скважин, показанных на рис. 2

№ 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 [24]			15	18	18	35	1	7	30	9	35
Кларк для углей [14]			11	12	8	23	2	4	25	5	13

в 10 раз, скандия – в 2 раза, лантана – в 2,5 раза и церия – в 2 раза. В то же время 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 ИСП не определялись. По малочисленным данным рентгено-флуоресцентного анализа, выполненного в лаборатории Вилюйской ГРЭ, и гамма-каротажу, 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 роллового типа локализованы в зонах

выклинивания пластового окисления, ширина которых составляет десятки-первые сотни метров. Имеющаяся сеть наблюдений (250 × 200 и 400 × 400) явно недостаточна для вскрытия таких тел. Полученные единичные анализы следует рассматривать как ориентировочные. В данном районе, вероятно, надо прогнозировать самостоятельные эпигенетические месторождения V, Sc и сопутствующих редких элементов.

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

Результаты детального картирования лимонитизированных и осветлённых пород пермской толщи, вмещающей триасовые силлы долеритов, показали наличие полосы, выклинивания зоны внутрипластового окисления, представленной

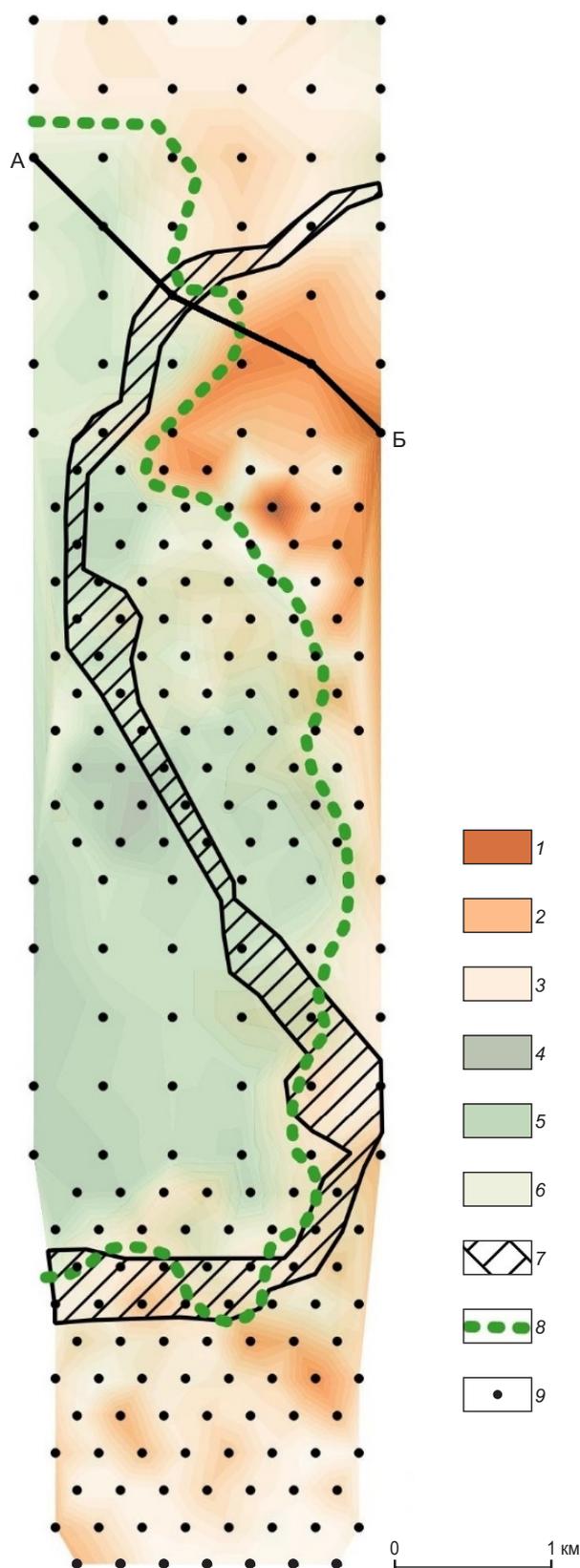


Рис. 3. Карта равных мощностей интервалов лимонитизации и осветлённых пермских пород и залегающих в них силлов триасовых траппов площади Бестях:

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

осветлёнными песчаниками. Она прослежена на расстоянии более 10 км (рис. 3).

На рис. 3 видно, что граница максимальных мощностей полностью окисленных песчаников конформна линии выклинивания силла. Частично лимонитизированные и осветлённые породы распространяются глубже под маломощным козырьком траппов. Также видно, что осветлённые 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 внутрислового окисления в пермских песчаниках.

На геологическом профиле показано сложное строение зоны пластового окисления и осветления (рис. 4). Надо отметить, что окисление захватывает песчаники перми и подстилающие породы кембрия.

В Мало-Ботуобинском и других алмазоносных районах Якутии в венд-кембрийской толще широко распространены древние, в том числе каменноугольного возраста, захороненные коры выветривания [7], в которых установлены повышенные концентрации скандия, ванадия, кобальта, никеля, лантана и церия [9, 11]. 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 терри-

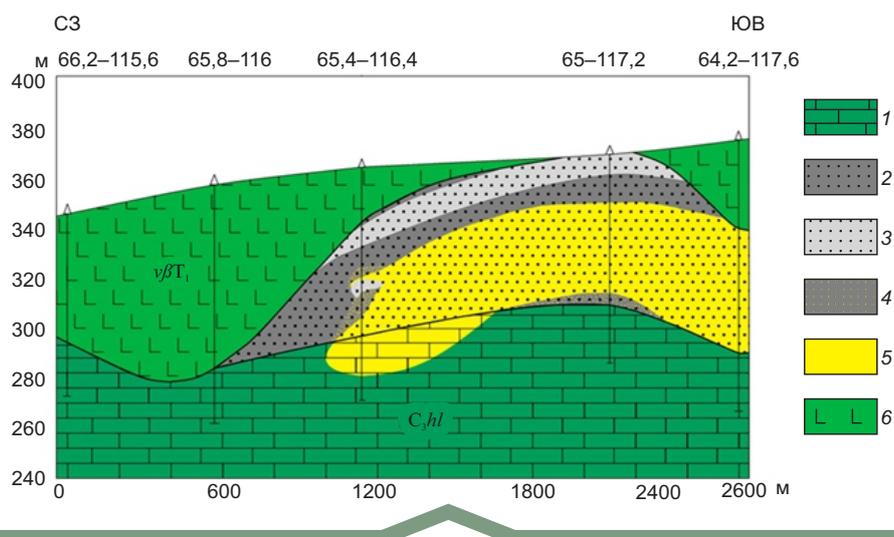


Рис. 4. Геологический профиль на севере площади Бестях, отражающий зоны пластового окисления:

1 – терригенно-карбонатные отложения холомолохской свиты кембрия; 2 – пермские сероцветные угленосные песчаники; 3 – осветлённые песчаники перми; 4 – частично лимонитизированные песчаники перми; 5 – полностью лимонитизированные породы; 6 – силлы триасовых габбро

генно-карбонатные породы холомолохской свиты накладываются трещинное и пластово-трещинное окисление в виде лимонита и гематита (рис. 5).

На площади Бестях проведено картирование прожилковых и пластовых гидроксидов желе-

за в кровле холомолохской свиты. Интересно отметить, что максимальное трещинное окисление распространяется за пределы ореола битумов, где они, очевидно, окислены (рис. 6).

Полученные результаты и их обсуждение. Полученные данные позволяют предположить,



Рис. 5. Распространение гидроксидов железа по тектоническим трещинам и слоям глинистых доломитов в кровельной части холомолохской свиты верхнего кембрия. Фрагмент разреза по керну по скважине № 66.2-116.4, интервал 90–94 м

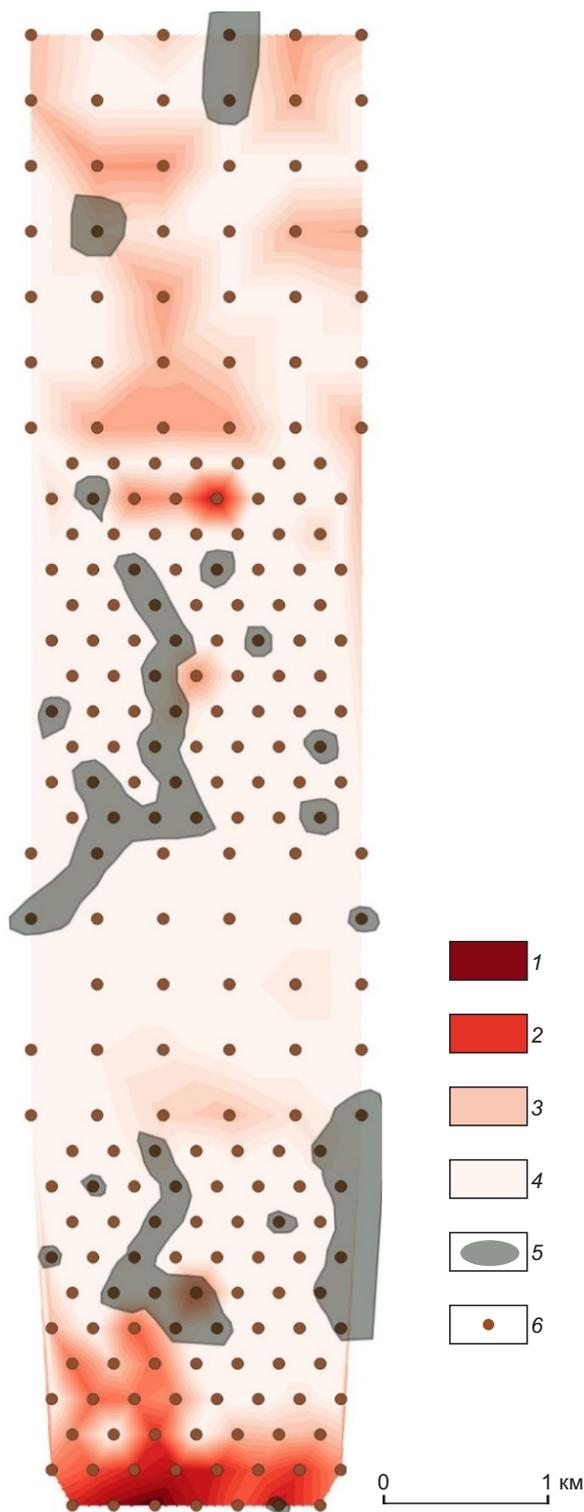


Рис. 6. Карта равных мощностей распространения гидроксидов железа по трещинам в кровле холомогоской свиты и прожилков битумов:

1–4 – мощности интервалов с гидроксидами железа (в м): 1 – 47–52,5, 2 – 31,5–47, 3 – 16–31,5, 4 – 1–16; 5 – прожилки битумов; 6 – скважины

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 [16, 18], следовательно, источником их вполне могли быть распространённые в районе триасовые вулканические туфы основного состава и силлы траппов. Также характерны повышенные фоновые концентрации этих элементов в тяжёлых нефтях и битумах [19, 20, 23]. Широкое распространение битуминозных пород показано выше.

Таким образом, на контакте сероцветных угленосных пород и осветлённых окисленных песчаников перми, а также битуминозных и окисленных пород кембрия вероятны концентрации ванадия и скандия. Можно предположить концентрации рения, для которого в геологическом строении рассматриваемой территории есть много общего с Брикетно-Желтухинским уран-рениевым месторождением, роллоподобные залежи которого локализованы в каменноугольных терригенных отложениях южного крыла Московской синеклизы. Их генезис связывают с пластовым окислением [2].

Полученные материалы по поисковой площади Бестях в Мало-Ботуобинском районе следует рассматривать в качестве постановочных для обоснования поисков месторождений ванадия, скандия и других редких и рассеянных элементов, в том числе рения, в зонах контакта окисленных и неизменённых угленосных пермских песчаников и углей, а также окисленных и битуминозных глинисто-карбонатных пород верхнего кембрия. Изученную площадь Бестях следует считать наиболее подготовленной для проведения поисковых работ на указанные виды стратегического дефицитного сырья.

Работа выполнена в рамках исследований МГРИ по гранту Российского Научного Фонда № 23–27–00280.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев С. А., Соболев П. Н., Таффарель Е. С., Голованова М. П., Гарифуллин И. И. Нефтегазодность Вилюйской синеклизы и перспективы

- поисков залежей углеводородов // Геология, физика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 12. – С. 14–26.
2. 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. – DOI : 10.31857/S0024497X20030064.
 3. 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.
 4. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / Под ред. И. Н. Солодова. – М. : ZetaPrint, 2022. – 183 с.
 5. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск : Изд-во ИГТУ, 2008. – 507 с.
 6. Дукардт Ю. А., Блажкун Д. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Серия Верхневиллюйская. Лист Р-50-II. Объяснительная записка. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2001.
 7. Зинчук Н. Н. Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы. – Новосибирск : Изд-во НГУ, 1994. – 240 с.
 8. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов : Справочник. Книга 4. Главные d-элементы. – М. : Издательство «Экология», 1996. – 206 с.
 9. Игнатов П. А., Еременко Р. У., Толстов А. В., Овчинников И. М. Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазоносной провинции // Горный журнал. – 2022. – № 7. – С. 12–21.
 10. Игнатов П. А., Еременко Р. У., Толстов А. В., Овчинников И. М. Перспективы обнаружения месторождений стратегических полезных ископаемых (Cu, Co, Ni, EPG, Sc, V, Li, REE, Li, Sr, графит, углеводороды) в алмазоносных районах юга Западной Якутии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2024. – Т. 66, № 1. – С. 65–78.
 11. 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 рудопроявления скандия // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2023. – № 28(2). – С. 187–201.
 12. 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.
 13. Игнатов П. А., Новиков К. В. Полевая диагностика тектонических нарушений и флюидоразрывных образований в кимберлитовмещающих отложениях нижнего палеозоя : методическое руководство. – Мирный : АЛРОСА, 2019. – 76 с.
 14. Кетрис М. П., Юдович Я. Э. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 648 с.
 15. Кириллина А. В., Васильева В. И., Симоненко В. И. Геохимические методы поисков кимберлитов на закрытых территориях западной Якутии // Роль геохимии в развитии МСБ ТПИ : прогноз, поиски, оценка инновационные технологии освоения редкометалльных объектов. – М. : ИМГРЭ, 2016. – С. 44–47.
 16. Ключарев Д. С. Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы. Рений : справочник / Научная редакция Быховского Л. З., редактор Спорыхина Л. В. – М. : ВИМС, 2016. – 39 с.
 17. Костровицкий С. И., Спецрус З. В., Яковлев Д. А., Фон-дер-Флаас Г. С., Суворова Л. Ф., Богуш И. Н. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / Отв. редактор ак. Н. П. Похиленко. – Мирный : АЛРОСА, 2015. – 480 с.
 18. Поликашина Н. С. Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы. Скандий : справочник / Научный редактор Быховский Л. З., редактор Тигунов Л. П. – М. : ВИМС, 2016. – 65 с.
 19. 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.
 20. Торикова 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.
 21. Фролов С. В., Карнюшина Е. Е., Коробова Н. И., Бакай Е. А., Курдина Н. С., Крылов О. В., Тарасенко А. А. Особенности строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Виллюйского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 13–30.
 22. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов мира. – М. : Недра, 1998. – 555 с.
 23. Якуцени С. П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. – СПб. : Недра, 2005. – 370 с.
 24. Средние содержания химических элементов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.geokniga.org/geowiki/средние-содержания-химических-элементов> (дата обращения 03.02.2022)

REFERENCES

1. *Vasilyev S. A., Sobolev P. N., Taffarel Ye. S., Golovanova M. P., Garifullin I. I.* Neftegazonosnost Vilyuyskoy sineklizy i perspektivy poiskov zalezhey uglevodorodov [Oil and gas potential of the Vilyui syncline and prospects for hydrocarbon deposits], *Geologiya, fizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2018, No. 12, pp. 14–26. (In Russ.)
2. *Vikentyev I. V., Kaylachakov P. E.* Unikalnoye mestorozhdeniye reniya v uglenosnykh peskakh karbona russkoy plity. Soobshcheniye 1. Geologicheskoye stroyeniye [Unique rhenium deposit in carboniferous coal-bearing sands of the Russian plate. Communication 1. Geological structure], *Litologiya i poleznye iskopyemye*, 2020, No. 3, pp. 209–226, DOI : 10.31857/S0024497X20030064. (In Russ.)
3. *Grakhanov S. A., Shatalov V. I., Shtyrov V. A., Kychkin V. R., Suleymanov A. M.* Rossypi almazov Rossii [Placers of diamonds of Russia], *Novosibirsk, Geo publ.*, 2007, 437 p. (In Russ.)
4. *Dobycha urana podzemnym vyshchelachivaniyem v kriolitozone* [Uranium mining by underground leaching in the cryolithozone], ed. I. N. Solodov, Moscow, ZetaPrint publ., 2022, 183 p. (In Russ.)
5. *Drozhdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V.* Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii [Cryohydrogeology of diamond deposits of Western Yakutia], *Irkutsk, IGTU publ.*, 2008, 507 p. (In Russ.)
6. *Dukardt Yu. A., Blazhkun D. V.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1, 200 000. Seriya Verkhnevilyuyskaya. List P-50-II. Obyasnitelnaya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1, 200,000. Verkhnevilyuyskaya Series. Sheet P-50-II. Explanatory note], *St. Petersburg, VSEGEI publ.*, 2001. (In Russ.)
7. *Zinchuk N. N.* Kory vyvetriviya i vtorichnyye izmeneniya kimberlitov Sibirskoy platformy [Weathering crusts and secondary changes in kimberlites of the Siberian platform], *Novosibirsk, NGU publ.*, 1994, 240 p. (In Russ.)
8. *Ivanov V. V.* Ekologicheskaya geokhimiya elementov, Spravochnik. Kniga 4. Glavnyye d-elementy [Ecological geochemistry of elements, Handbook. Book 4. Main d-elements], Moscow, *Ekologiya publ.*, 1996, 206 p. (In Russ.)
9. *Ignatov P. A., Yeremenko R. U., Tolstov A. V., Ovchinnikov I. M.* Perspektivy vyyavleniya mestorozhdeniy skandiya v Yakutskoy almazonosnoy provintsii [Prospects for identifying scandium deposits in the Yakut diamond province], *Gornyy zhurnal*, 2022, No. 7, pp. 12–21. (In Russ.)
10. *Ignatov P. A., Yeremenko R. U., Tolstov A. V., Ovchinnikov I. M.* Perspektivy obnaruzheniya mestorozhdeniy strategicheskikh poleznykh iskopyemykh (Cu, So, Ni, EPG, Sc, V, Li, REE, Li, Sr, grafit, uglevodorody) v almazonosnykh rayonakh yuga Zapadnoy Yakutii [Prospects for discovering deposits of strategic minerals (Cu, Co, Ni, EPG, Sc, V, Li, REE, Li, Sr, graphite, hydrocarbons) in diamond-bearing regions of the south of Western Yakutia], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 2024, V. 66, No. 1, pp. 65–78. (In Russ.)
11. *Ignatov P. A., Yeremenko R. U., Tolstov A. V., Ovchinnikov I. M.* Plastovoye i plastovo-treshchinnoye okisleniye v karbonovo-permskikh otlozheniyakh i drevney kore vyvetriviya Zapadnoy Yakutii i svyazannyye s nim rudoproyavleniya skandiya [Stratum and strata-fracture oxidation in Carboniferous-Permian deposits and ancient weathering crust of Western Yakutia and associated scandium ore occurrences], *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki*, 2023, No. 28(2), pp. 187–201. (In Russ.)
12. *Ignatov P. A., Zaripov N. R., Kovalchuk O. Ye.* Indikatornyye svoystva prozhilkovogo osvetleniya krasnotsvetnykh otlozheniy pri prognozirovanii i poiskakh kimberlitov, metodicheskoye posobiye [Indicator properties of vein lightening of red-colored deposits in forecasting and prospecting for kimberlites, methodological manual], *Mirny, ALROSA publ.*, 2022, 155 p. (In Russ.)
13. *Ignatov P. A., Novikov K. V.* Polevaya diagnostika tektonicheskikh narusheniy i flyuidorazryvnykh obrazovaniy v kimberlitovmeshchayushchikh otlozheniyakh nizhnego paleozoya, metodicheskoye rukovodstvo [Field diagnostics of tectonic faults and fluid-fracturing formations in kimberlite-hosting deposits of the Lower Paleozoic, methodological guide], *Mirny, ALROSA publ.*, 2019, 76 p. (In Russ.)
14. *Ketris M. P., Yudovich Ya. E.* Toksichnyye elementy-primesi v iskopyemykh uglyakh [Toxic impurity elements in fossil coals], *Yekaterinburg, UrO RAN publ.*, 2005, 648 p. (In Russ.)
15. *Kirillina A. V., Vasilyeva V. I., Simonenko V. I.* Geokhimicheskiye metody poiskov kimberlitov na zakrytykh territoriyakh zapadnoy Yakutii [Geochemical methods of kimberlite exploration in closed territories of western Yakutia], *Rol geokhimii v razviti MSB TPI, prognoz, poiski, otsenka innovatsionnyye tekhnologii osvoyeniya redkometalnykh obyektov*, Moscow, *IMGRE publ.*, 2016, pp. 44–47. (In Russ.)
16. *Klyucharev D. S.* Trebovaniya k kachestvu mineralnogo syr'ya, sodержashchego redkiye i redkozemelnyye metally. Reniy, spravochnik [Requirements for the quality of mineral raw materials containing rare and rare earth metals. Rhenium, reference book], ed. Bykhovskiy L. Z., Sporykhin L. V., Moscow, *VIMS publ.*, 2016, 39 p. (In Russ.)
17. *Kostrovitskiy S. I., Spetsius Z. V., Yakovlev D. A., Fon-der-Flaas G. S., Suvorova L. F., Bogush I. N.* Atlas korennykh mestorozhdeniy almazov Yakutskoy

- kimberlitovoy provintsii [Atlas of primary diamond deposits of the Yakut kimberlite province], ed. N. P. Pokhilenko, Mirny, ALROSA publ., 2015, 480 p. (In Russ.)
18. Polikashina N. S. Trebovaniya k kachestvu mineralnogo syrya, sodержashchego redkiye i redkozemelnyye metally. Skandiy, spravochnik [Requirements for the quality of mineral raw materials containing rare and rare earth metals. Scandium, reference book], ed. Bykhovsy L. Z., Tigonov L. P, Moscow, VIMS publ., 2016, 65 p. (In Russ.)
 19. Poplavko Ye. M., Ivanov V. V., Karasik T. G. [et al.] O kontsentratsii reniya v neftyakh, neftyanykh bitumakh i goryuchikh slantsakh [On the concentration of rhenium in oils, oil bitumens and oil shales], Geokhimiya, 1974, No. 9, pp. 1399–1402. (In Russ.)
 20. Torikova M. V., Kudinov Yu. A., Timofeyev P. V. Redkiye metally v neftyakh, iskopayemykh uglyakh, produktakh ikh pererabotki i mineralizovannykh vodakh [Rare metals in oils, fossil coals, their processing products and mineralized waters], Razvedka i okhrana neдр, 1996, No. 8, pp. 21. (In Russ.)
 21. Frolov S. V., Karnyushina Ye. Ye., Korobova N. I., Bakay Ye. A., Kurdina N. S., Krylov O. V, Tarasenko A. A. Osobennosti stroyeniya, osadochnyye komplekсы i uglevodorodnyye sistemy Leno-Vilyuyskogo neftegazonosnogo basseyna [Structural features, sedimentary complexes and hydrocarbon systems of the Lena-Vilyui oil and gas basin], Georesursy, 2019, V. 21, No. 2, pp. 13–30. (In Russ.)
 22. Kharkiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. Korennyye mestorozhdeniya almazov mira [Primary diamond deposits of the world], Moscow, Nedra publ., 1998, 555 p. (In Russ.)
 23. Yakutseni S. P. Rasprostranennost uglevodorodnogo syrya, obogashchennogo tyazhelymi elementami-primesyami. Otsenka ekologicheskikh riskov [Prevalence of hydrocarbon raw materials enriched with heavy impurity elements. Assessment of environmental risks], St. Petersburg, Nedra publ., 2005, 370 p. (In Russ.)
 24. Sredniye sodержaniya khimicheskikh elementov [Average contents of chemical elements], available at: <https://www.geokniga.org/geowiki/средние-содержания-химических-элементов> (03.02.2022)

Статья поступила в редакцию 08.11.24; одобрена после рецензирования 28.11.24; принята к публикации 03.12.24.
The article was submitted 08.11.24; approved after reviewing 28.11.24; accepted for publication 03.12.24.