ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 553.8

Поисковые модели коренных месторождений алмазов севера Восточно-Европейской платформы

В.Н.УСТИНОВ[1]✉, **И.И.МИКОЕВ**[2], **Г.Ф.ПИВЕНЬ**[3]
[1] *АО «АГД Даймондс», Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *АО «АГД Даймондс», Архангельск, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Устинов В.Н., Микоев И.И., Пивень Г.Ф. Поисковые модели коренных месторождений алмазов севера Восточно-Европейской платформы // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318. DOI: 10.31897/PMI.2022.49

Аннотация. В результате комплексного изучения геологического строения и алмазоносности северной части Восточно-Европейской платформы, обобщения материалов, накопленных различными организациями в СССР, Российской Федерации и других государствах, выделены и охарактеризованы три основные поисковые модели коренных месторождений алмазов: Карельская, Финская и Архангельская. На известных примерах, в том числе данных по разрабатываемым месторождениям им. М.В.Ломоносова и В.П.Гриба, рассмотрены геологические, структурные, минералогические и петрографические критерии локального прогноза, а также особенности проявления кимберлитовых и лампроитовых тел в ореолах рассеяния и геофизических полях. Показано, что наиболее сложные поисковые обстановки создаются на закрытых территориях Русской плиты, где в ряде случаев коренные алмазоносные породы близки по петрофизическим свойствам вмещающим образованиям, а погребенные ореолы рассеяния кимберлитовых минералов в континентальных каменноугольных и четвертичных отложениях прослеживаются на незначительном расстоянии от источников. Продемонстрированы отличия поисковых признаков магнезиальных (месторождение им. М.В.Ломоносова) и железисто-магнезиальных (месторождение им. В.П.Гриба) кимберлитов. Сделаны выводы о потенциале алмазоносности модельных объектов различных типов.

***Ключевые слова*:** алмаз; кимберлит; лампроит; трубка; месторождение; поисковая модель; аномалия; Восточно-Европейская платформа

***Поступила*: 04.05.2022** ***Принята*: 15.06.2022** ***Онлайн*: 26.07.2022** ***Опубликована*: 26.07.2022**

Введение. Восточно-Европейская платформа (ВЕП) является крупной алмазоносной провинцией, где в настоящее время разрабатываются два месторождения – им. М.В.Ломоносова и им. В.П.Гриба. В последние годы из них добывается около 20 % российских и 6-7 % мировых алмазов. Они располагаются в пределах Карело-Кольской субпровинции на севере ВЕП. Карело-Кольская алмазоносная субпровинция занимает площадь более полутора миллионов квадратных километров и охватывает Архангельскую, Вологодскую, Мурманскую, Ленинградскую, Псковскую, Новгородскую области, Карелию и Республику Финляндию. На ее территории установлено около 100 трубок, а также более 100 даек, силлов и штокверков кимберлитов и лампроитов, отличающихся по степени алмазоносности. Несмотря на значительные объемы поисковых работ, после выявления трубки им. В.П.Гриба (1996) не было открыто ни одного месторождения. Вполне очевидно, что актуальной проблемой алмазодобывающей промышленности РФ является восполнение выбывающих запасов алмазов за счет новых открытий. В настоящей статье речь пойдет о поисковых моделях коренных месторождений алмазов, которые прогнозируются в пределах территорий северной части ВЕП, отличающихся различными поисковыми обстановками.

Геологическое строение и алмазоносность территории. Восточно-Европейская платформа с эпикарельским кристаллическим фундаментом состоит из разнотипных, разномасштабных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и разновозрастных тектонических элементов. В минерагеническом аспекте ВЕП представляет собой алмазоносную провинцию, а крупнейшие входящие в ее состав архейские мегаблоки (Карело-Кольский, Волго-Уральский и Воронежско-Украинский) выделяются в ранге субпровинций. Среди них наибольшим потенциалом обладает Карело-Кольская субпровинция, в пределах которой расположено подавляющее большинство известных на территории платформы проявлений алмазоносных и потенциально алмазоносных кимберлитов и лампроитов, в том числе месторождения им. М.В.Ломоносова и им. В.П.Гриба.

В северной части ВЕП выделяются две надпорядковые геологические структуры – Балтийский (Фенноскандинавский) щит и Русская плита. Первый представляет собой глубокометаморфизованное складчатое основание (фундамент) платформы, характеризующееся сложным блоковым строением. В южном и восточном направлениях породы фундамента полого погружаются под осадочный чехол Русской плиты и входящих в ее состав Московской и Мезенской синеклиз. В геологическом строении северной части ВЕП принимают участие три структурных этажа. Нижний – архейско-нижнепротерозойский складчатый кристаллический фундамент платформы. Средний сложен нескладчатыми образованиями рифея и нижнего венда, сохранившимися в отдельных прогибах и грабенах. Верхний этаж представлен пологозалегающими отложениями верхнего венда и палеозоя, слагающими сплошной чехол Русской плиты.

В пределах Карело-Кольского мегаблока (магакратона), где сосредоточены все известные ныне проявления кимберлитового и лампроитового магматизма севера ВЕП и перспективные для поисков месторождений алмазов площади, выделяются три крупные геоструктурные единицы – блоки первого порядка: Мурманский, Кольский (Кольско-Кулойский) и Карельский, каждый из которых характеризуется своими особенностями геологического строения и развития в докембрии и фанерозое. Глубинными разломами они разделяются на блоки земной коры (террейны) более высоких порядков (рис.1), которые отличаются друг от друга историей геологического развития, особенностями геофизических полей, глубинным строением, интенсивностью тектонотермальной переработки и соответственно перспективами выявления промышленно-алмазоносных объектов.

В истории развития земной коры Карело-Кольской субпровинции можно выделить несколько крупных этапов – тектонических мегациклов: архейского, раннепротерозойского (карельского), позднепротерозойского и фанерозойского. На фоне тектонического режима того или иного мегацикла локально проявляются периоды тектономагматической активизации (ТМА), с которыми связано внедрение алмазоносных магматитов. В настоящее время на севере ВЕП достоверно установлены пять эпох проявления алмазоносного магматизма: раннепротерозойская, среднерифейская, позднерифейская, позднерифейско-ранневендская и среднепалеозойская.

Архейский мегацикл (*>3500-2500 млн лет*), соответствующий акротеме, рассматривается как доплатформенный этап формирования зрелой континентальной коры. Архейский акрон характеризуется единичными проявлениями алмазоносного магматизма в мире [1-3], а промышленные объекты среди них не установлены. Теоретически подобные тела могут быть обнаружены и в пределах Балтийского щита. Учитывая относительно неплохую изученность и обнаженность последнего, следует признать поиски промышленно-алмазоносных объектов архейского возраста бесперспективными.

Раннепротерозойский (*карельский*) *мегацикл* (*2500-1650 млн лет*) отвечает соответствующей эонотеме и характеризуется протоплатформенным режимом развития территории. Карельская эпоха отделена от предшествующей перерывом длительностью около 100 млн лет. С раннего протерозоя территория развивается как кратонизированная область, при этом сохранилась некоторая самостоятельность развития различных ее частей. С калевийским этапом связана древнейшая в регионе эпоха кимберлитового магматизма, представленная алмазоносным телом Кимозеро, расположенным в пределах Карельского кратона и приуроченным к Онегозерскому интракратонному прогибу. В настоящее время имеется три определения абсолютного возраста Кимозерских кимберлитов, имеющих значительный разброс: 1986 [4], 1920 [5] и 1764 млн лет [6]. Последняя датировка, скорее всего, отражает возраст метаморфизма. Наиболее надежными представляются датировки 1986 и 1920 млн лет. К настоящему времени раннепротерозойские (палеопротерозойские) промышленно-алмазоносные магматические тела в мире не установлены. При этом в Бразилии разрабатываются палеопротерозойские метаконгломераты группы Вила Нова, а в Гане –

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.49

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

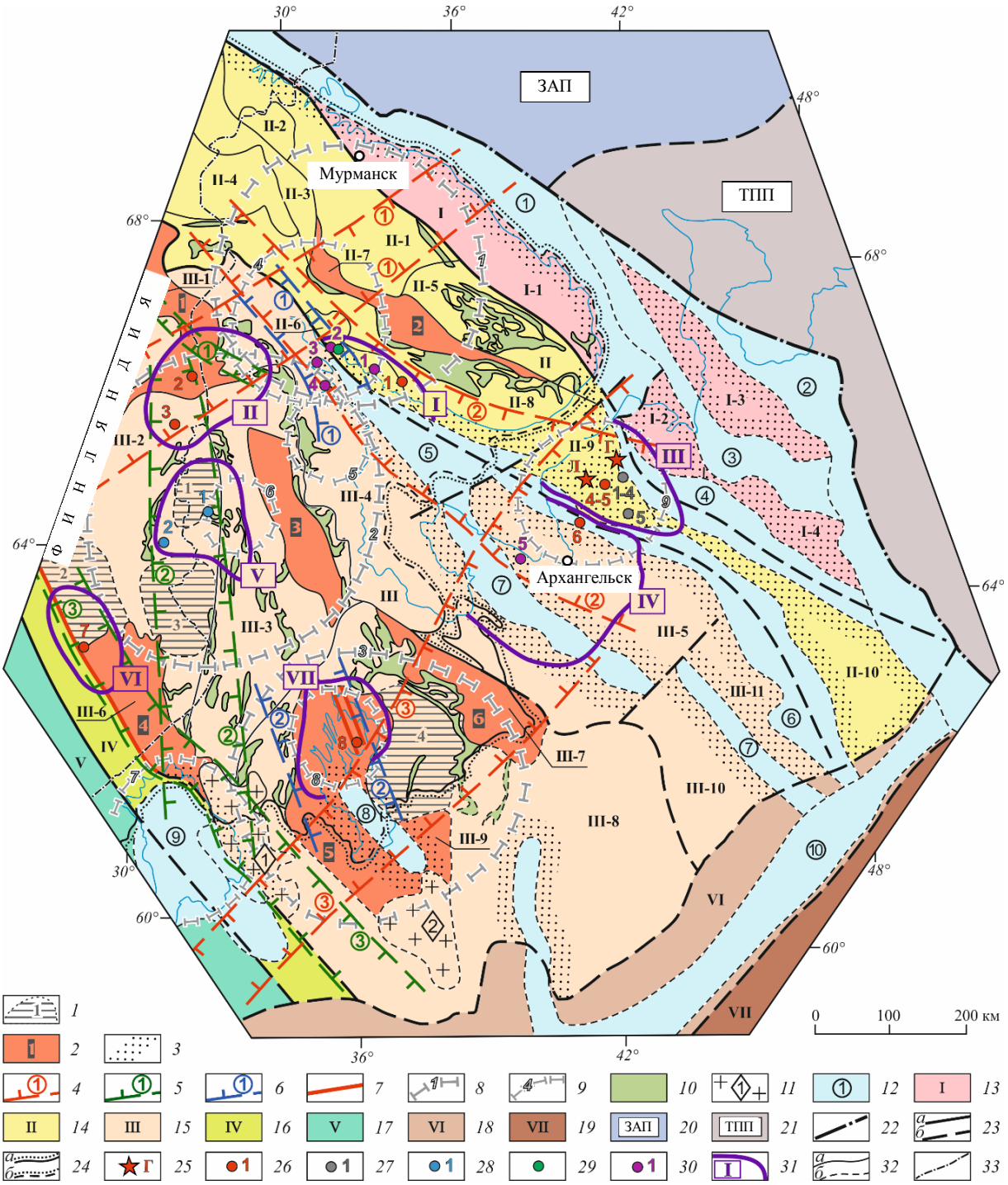


Рис.1. Структурно-тектонические факторы проявления алмазоносного магматизма северной части Восточно-Европейской платформы [7]

1-9 – благоприятные структурно-тектонические факторы проявления алмазоносного магматизма (установленные и предполагаемые). Установленные: *1* – области раннеархейской (саамской) стабилизации: Войницкий (1), Исалми (2), Тулосский (3), Водлозерский (4); *2* – основные раннепротерозойские проторифтогенные структуры: Куолаярвинский (1), Имандра-Варзугский (2), Шомбозерско-Лехтинский (3), Оутокумпу-Ладожский (4), Онегозерский (5), Ветреного пояса (6); *3* – зоны краевых дислокаций рифейских авлакогенов; *4-6* – основные зоны тектономагматической активизации, в том числе рудовмещающие и рудоконтролирующие разломы: *4* – среднепалеозойские (Хибино-Ботнический рифт-1, Ковдорско-Зимнебережная-2, Ильменско-Мезенская-3); *5* – рифейские (Салли-Туттиярвинская-1, Ладожско-Куусамская-2) и рифейские – вендские (Куопийско-Сортавальская-3); *6* – позднекарельские (Куземско-Ковдорская-1, Заонежская-2); *7* – крупные глубинные кимберлитоконтролирующие разломы; *8, 9* – кольцевые структуры (КС): *8* – диаметром до 400 м (Кольская-1, Калевальская-2, Онегозерская-3), *9* – диаметром 100-200 км (Кандалакшская-4, Энгозерская-5, Нюкозерская-6, Ладожская-7, Заонежская-8, Зимнебережная-9). Предполагаемые: *10* – позднеархейские зеленокаменные пояса; *11, 12* – неблагоприятные факторы: *11* – массивы гранитов-рапакиви (области архейской коры, переработанной в раннем протерозое): Улялегско-Салминский (1), Белозерский (2), *12* – авлакогены, впадины, выполненные отложениями рифея и рифея – нижнего венда: Кильдинско-Святоносская ступень (1), Предтиманский (Мезенско-Вычегодский) краевой (перикратонный) прогиб (2), Сафоновско-Понойский (3), Лешуконский (4),

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Рис.1. Окончание

Беломорский (5), Керецко-Пинежский (6), Онежско-Двинский (7) и Онегозерский (8) авлакогены, Пашско-Ладожский (Ладожский) прогиб (9), Среднерусский авлакоген (10); *13-19* – основные структуры фундамента северной части ВЕП: *13* – Мурманский геоблок (архон), I; *14* – Кольско-Кулойский геоблок (архон), II; *15* – Карельский геоблок (архон), III; *16* – Саво-Ладожско-Рыбинский подвижный пояс, IV; *17* – Свекофеннский геоблок, V; *18* – Среднерусский складчатый пояс, VI; *19* – Волго-Уральский мегаблок (Сысольский свод), VII; *20, 21* – платформы, граничащие с ВЕП: *20* –Западно-Арктическая, *21* – Тимано-Печорская; *22* – граница Восточно-Европейской платформы; *23* – разломы: *а* – установленные, *б* – предполагаемые; *24* – граница отложений Русской плиты: *а* – на дневной поверхности, *б* – под акваториями; *25-30* – проявления кимберлитов и родственных им пород: *25* – месторождения алмазов (Г – им. В.П.Гриба, Л – им. М.В.Ломоносова); *26* – кимберлитовые поля (с установленной алмазоносностью): 1 – Ермаковское (PZ_2), 2 – Куусамо Северный (RF_3), 3 – Куусамо Южный (RF_3), 4, 5 – Черноозерское, Золотицкое (PZ_2), 6 – Чидвинско-Ижмозерское (PZ_2), 7 – Каави-Куопио (RF_3-V_1), 8 – Кимозерское (KR_2^1); *27* – кимберлитовые поля (с неустановленной или убогой алмазоносностью): 1-4 – Мельское, Мегорское, Верхотинское, Кепинское (PZ_2), 5 – Суксомское (PZ_2); *28* – лампроит-кимберлитовые поля (с установленной алмазоносностью): 1 – Костомукшское (RF_2), 2 – Кумо-Лентира (RF_2); *29* – Порьегубское лампроитовое поле (KR_2^3) (с неустановленной алмазоносностью); *30* – поля родственных кимберлитам пород (с неустановленной алмазоносностью): 1 – Умбинское оливиновых мелилититов и ультраосновных фоидитов (PZ_2), 2 – Северо-Кандалакшское щелочных пикритов, мелаанальцимитов, пикродолеритов (PZ_2), 3 – Белые Щели – поле пикритов, ультраосновых фоидитов, лампрофиров (PZ_2), 4 – Гридино – поле пикритов (PZ_2), 5 – Ненокское мелилититов (PZ_2); *31* – алмазоносные районы: I – Терскобережный, II – Северо-Карельский, III – Зимнебережный, IV – Архангельский, V – Западно-Карельский, VI – Центрально-Финляндский, VII – Северо-Онегозерский; *32* – геологические границы: *а* – достоверные, *б* – предполагаемые; *33* – государственная граница РФ.
Основные блоки фундамента севера ВЕП: I-1 – Северо-Кольский, I-2 – Мезенский, I-3 – Несско-Тылугский горст, I-4 – Мезенский горст; II-1 – Центрально-Кольский, II-2 – Печенгский, II-3 – Верхнетуломский (Инари), II-4 – Лапландский, II-5 – Кейвский, II-6 – Колвицкий, II-7 – Имандра-Варзугский, II-8 – Кольского Беломорья, II-9 – Зимнебережный, II-10 – Полтинско-Елькибско-Вашкинская зона поднятий; III-1 – Куолаярвинский, III-2 – Фенно-Карельский, III-3 – Центрально-Карельский, III-4 – Карельского Беломорья, III-5 – Двинский, III-6 – Оутокумпу-Ладожский, III-7 – Ветреного Пояса, III-8 – Южно-Карельский, III-9 – Онегозерский, III-10 – Онего-Кодимское поднятие, III-11 – Архангельский горст

одновозрастные метаосадки супергруппы Бирим [8]. На территории севера ВЕП могут быть выявлены раннепротерозойские коренные источники, содержащие алмазы в промышленных концентрациях.

Позднепротерозойский мегацикл (*1650 – около 600 млн лет*) охватывает промежуток времени от раннего рифея до раннего венда (включительно). Это авлакогенная стадия платформенного этапа геологического развития севера платформы. Рифейская эпоха отделена от карельской периодом тектонического и эндогенного покоя длительностью около 100 млн лет. В пределах позднепротерозойского мегацикла на севере ВЕП достоверно установлены три эпохи алмазоносного магматизма – среднерифейская, позднерифейская и позднерифейско-ранневендская. Среднерифейская (мезопротерозойская) эпоха отличается достаточно высокой продуктивностью в различных провинциях мира. Ее характерной особенностью является наличие месторождений как кимберлитового, так и лампроитового типов. Примером первых могут служить: Лерала (Ботсвана) – 1333, Премьер (ЮАР) – 1180 и Салвадор (Бразилия) – 1150 млн лет; вторых: Аргайл (Австралия) – 1175 и Маджгаван (Индия) – 1075 млн лет [1].

В приграничной области РФ и Финляндии на площади более 10 тыс. км^2 установлено более 110 даек среднерифейских (1200-1230 млн лет) [9, 10] слабоалмазоносных кимберлитов и лампроитов. Дайки лампроитов, предположительно среднерифейского возраста, установлены в пределах перикратонного прогиба Ветреного пояса (район оз. Левушка). Приведенные данные позволяют прогнозировать на территории севера ВЕП обнаружение промышленно-алмазоносных объектов, связанных со среднерифейской эпохой алмазоносного магматизма.

Позднерифейская и позднерифейско-ранневендская (неопротерозойские) эпохи проявились достаточно широков мире. Кимберлитовые тела этого периода известны в Австралии, Африке (Либерия), Северной Америке (США, Канада), Южной Америке (Бразилия, Венесуэла), Гренландии, Индии. Однако их продуктивность значительно уступает предыдущей мезопротерозойской эпохе. На севере ВЕП в позднем рифее сформировались тела алмазоносных кимберлитов поля Куусамо Южный (в районе г. Куусамо, Финляндия), возраст которых составляет 758 млн лет [11]. Предполагается, что с этим же этапом связано образование трубок и даек оливиновых лампроитов поля Куусамо Северный (Финляндия). Поля расположены примерно в 40 км друг от друга. В некоторых телах установлены микро- и макроалмазы. С позднерифейско-ранневендской эпохой связано внедрение кимберлитов поля Каави-Куопио, расположенного в Юго-Восточной Финляндии в краевой части Карельского кратона. Их возраст составляет 589-626 млн лет [12]. В пределах поля выявлено около 30 тел (трубки, дайки), большая часть из которых алмазоносна, но не достигает промышленного уровня. В пределах российской части Балтийского щита кимберлиты и лампроиты позднерифейского и позднерифейско-ранневендского возраста пока не установлены, но перспективы обнаружения промышленно-алмазоносных объектов данных эпох сохраняются.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Фанерозойский мегацикл (*<570-555 млн лет*) представляет собой плитную стадию платформенного этапа эволюции севера ВЕП. Важное значение в истории развития региона и алмазоносности имеет герцинский этап, охватывающий период от среднего девона до поздней перми. Процессы тектогенеза в это время в той или иной форме проявлены на большей части территории Карело-Кольской субпровинции. Среднепалеозойская (позднедевонско-раннекаменноугольная) эпоха является наиболее алмазопродуктивной как для Восточно-Европейской, так и Сибирской платформ. С ней связаны все известные коренные месторождения алмазов России. В этот период в пределах Зимнебережного и Архангельского алмазоносных районов происходит масштабная магматическая деятельность с образованием трубок взрыва щелочно-ультраосновного (кимберлиты, мелилититы) и основного (толеитовые базальты) составов, на Онежском полуострове внедряются трубки взрыва мелилититов. В это же время завершается формирование кандалакшского гипабиссального комплекса, представленного кимберлитовыми трубками взрыва и дайками щелочных пикритов, пикродолеритов, пикритов, лампрофиров и карбонатитов.

Характерной особенностью герцинского тектогенеза в регионе явилось широкое развитие зон ТМА, представляющих собой системы сближенных глубинных разломов, контролирующих проявления мантийного, в том числе щелочно-ультраосновного, магматизма. По отношению к региональным структурам фундамента они часто занимают секущее положение, создавая автономный структурный план. В этот период кроме Хибино-Ботнического рифта сформировалась Ковдорско-Зимнебережная зона ТМА (рис.1), которая представляет собой активизированные в среднем палеозое плечи рифейского Беломорского авлакогена, в том числе его северной Керецко-Пинежской ветви. Она трассируется в юго-восточном направлении на расстояние около 800 км от района г. Ковдор на юго-восток до Беломорско-Кулойского плато. Ее ширина составляет от 80-90 до 200-250 км. К данной зоне ТМА приурочены дайки щелочных базитов и ультрабазитов Кандалакшского залива, трубки взрыва Терского берега, в том числе алмазоносные кимберлиты Ермаковского поля, многочисленные тела кимберлитов и родственных пород Зимнебережного района, включая месторождения им. М.В.Ломоносова и им. В.П.Гриба.

Методика исследований. Разрабатываемые в настоящее время в мире коренные месторождения алмазов представлены кимберлитами или лампроитами. Подавляющая их часть относится к кимберлитам. Следует заметить, что за последние десятилетия наряду с этими коренными источниками стали известны и другие породы, содержащие алмазы. К ним относятся коматииты Гайаны [13], Ганы [14-16] и лампрофиры Канады [17, 18]. Два последних типа пород в статье не рассматриваются, хотя можно предполагать выявление их алмазоносных разновидностей в пределах Карело-Кольской субпровинции.

Месторождения алмазов в кимберлитах и лампроитах на площадях с различными типами поисковых обстановок отличаются по комплексу особенностей, которые являются следствием различий в строении литосферной мантии, определяющей особенности вещественного состава коренных источников, и истории их геолого-геоморфологической эволюции. Основные критерии, отличающие алмазоносные тела, могут быть объединены в несколько групп: геологические; структурные; минералогические и петрографические; проявление коренных источников алмазов в виде ореолов рассеяния кимберлитовых минералов в перекрывающих отложениях; геофизические.

Среди геологических критериев принимаются во внимание морфология тел и их размеры, время формирования, величина эрозионного среза, мощность перекрывающих отложений и их возраст, прогнозно-поисковый тип проявления трубки в терригенных коллекторах [19] и тип поисковой обстановки. До самых последних лет промышленные месторождения были связаны только с телами трубочной формы. Однако обнаруженный Н.П.Похиленко в конце 1990-х годов комплекс кимберлитовых даек в районе оз. Снэп-Лейк (кратон Слейв, Канада) ставит дайковый тип месторождений в разряд экономически высокозначимых [20]. Алмазоносные дайки, жилы и штокверки известны также на территории ЮАР, Сьерра-Леоне и Гвинеи.

Тип поисковой обстановки определяется структурной позицией территории в пределах щита, плиты или зоны их сочленения и набором других геологических признаков [21], которые предполагают использование соответствующего комплекса методов поисков. В северной части ВЕП выделяются три основных типа обстановок: Карельский, Онежский и Архангельский.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Структурный контроль проявления месторождений предполагает анализ признаков локального контроля, к которым относятся: рудовмещающие разломы, совпадающие с длинными осями трубок, зоны складчато-разрывных дислокаций пород кимберлитовмещающего цоколя (КВЦ), мульды проседания околотрубочного пространства и усложнения структуры подошвы свит в верхней части КВЦ.

Среди минералогических и петрографических критериев месторождений алмазов в кимберлитах и лампроитах следует выделять типы пород, минеральные ассоциации ИМК и параметры алмазоносности. Кимберлиты и лампроиты [22] – это гипабиссальные породы, не имеющие аналогов среди плутонических и вулканических пород, объединяются в пределах гипабиссального класса в одну группу, разделенную на три семейства: лампрофиры, лампроиты и кимберлиты (с подсемейством родственных им щелочных бесполевошпатовых пикритов).

Среди кимберлитов Сибирской и Восточно-Европейской провинций по составу выделяются три типа пород: магнезиальные, железисто-магнезиальные и щелочные титанисто-магнезиальные (по материалам А.Д.Харькива с соавторами). Различия между двумя первыми типами пород по петрохимическим особенностям не существенны. Более контрастно они различаются по содержанию и составу глубинных минералов – пиропа, пикроильменита, хромшпинелида и алмаза. Магнезиальная группа кимберлитов отличается от железисто-магнезиальной несколько большим содержанием MgO и меньшим – суммарного железа. Месторождения алмазов в России встречаются только в первых двух типах пород. На территории Зимнебережного района ВЕП все трубки месторождения им. М.В.Ломоносова принадлежат магнезиальному типу и лишь трубка им. В.П.Гриба – железисто-магнезиальному. Кимберлиты подразделяются также на группы I и II по содержанию характерных минералов [23]. Кимберлиты группы II (оранжиты) имеют минералогическое сходство с лампроитами, хотя существуют также и различия, позволяющие отличать эти породы. Некоторые породы имеют сходство по петрохимическим, минералогическим и геохимическим характеристикам с кимберлитами группы II и оливиновыми лампроитами. Они условно отнесены к породам промежуточного состава K2L [24]. Для лампроитов в целом характерны те же индикаторные минералы, что и для кимберлитов, но существенно преобладающими являются хромшпинелид и хромдиопсид, а пироп и пикроильменит присутствуют в крайне незначительных количествах. В качестве характерного минерала в лампроитах часто отмечается марганцовистый ильменит. Родственными кимберлитам и лампроитам породами, сопутствующими им в некоторых полях, а также образующими отдельные поля, являются щелочные пикриты, минетты и ультрамафитовые лампрофиры.

Содержания алмазов в коренных источниках определяются с использованием данных мелко- или крупнообъемного опробования. Использованы следующие градации алмазоносности (кар./т): убогая (менее 0,05), низкая (0,05-0,25), средняя (0,25-1,0) и высокая (более 1,0). На начальном этапе предварительная оценка продуктивности кимберлитов, лампроитов и родственных пород проводится на основе интерпретации химических составов ИМК по результатам рентгеноспектрального микрозондового анализа, которая выполняется с использованием различных диагностических диаграмм, позволяющих определять принадлежность индикаторных минералов к определенному парагенезису: пиропов [25, 26], пикроильменитов [27-29], хромшпинелидов [25, 30, 31], клинопироксенов [27, 32, 33]. Важным критерием алмазоносности искомых кимберлитов и родственных пород являются *P-T* условия образования их мантийных расплавов, которые могут быть восстановлены на основе оценки физико-химических параметров (температуры, давления и степени окисленности – восстановленности) кристаллизации отдельных высокобарических минералов [34-36], перидотитовых [37, 38] и эклогитовых [39, 40] ассоциаций.

Коренные источники алмазов часто проявляются в осадочных толщах в виде ореолов рассеяния индикаторных минералов кимберлитов, лампроитов и родственных пород (ИМК). Наибольший практический интерес при проведении прогнозно-поисковых работ среди ИМК представляют пироп, пикроильменит, хромдиопсид и хромшпинелид, а также алмаз. Ореолы рассеяния характеризуются повышенными содержаниями ИМК относительно фоновых. Вся совокупность кимберлитовых минералов в терригенных коллекторах образует шлейфы или ареалы рассеяния. По взаимоотношению с источниками выделяются ореолы рассеяния ближнего (до 5-10 км), умеренного (до 30-40 км) и дальнего (десятки и сотни километров) переноса. Чем ближе к коренному источнику, тем больше слабоизношенных ИМК содержится в ореолах рассеяния. Используется деление

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

на классы износа (I-V) по А.Д.Харькиву [41]. ИМК I класса (сохранность очень хорошая) – неизношенные зерна, а сильноизношенные минералы относятся к V классу.

Геофизические признаки месторождений алмазов выявляются по данным магниторазведки, электроразведки, гравиразведки и других методов. Индикационные характеристики поисковых объектов определяются не столько их собственными петрофизическими параметрами, сколько контрастом относительно вмещающих пород. Физические свойства кимберлитов и лампроитов изменяются в широких пределах, но все же находятся в определенном диапазоне значений, что позволяет использовать ряд геофизических методов при алмазопоисковых работах практически во всех регионах России и мира. Прежде всего, это их повышенные магнитные свойства пород. Другим параметром является пониженное электрическое сопротивление, характерное для большинства тел. Средние значения плотности кимберлитов и лампроитов также, как правило, пониженные.

Комплекс перечисленных методических приемов использован для характеристики моделей месторождений алмазов, которые разработаны на основе изученных авторами объектов в пределах различных типов поисковых обстановок севера ВЕП. Говоря о моделях месторождений, мы имеем в виду прежде всего тела трубочной формы, которые являются их основным морфологическим типом. При этом вполне вероятно и выявление алмазоносных даек, жил, штокверков.

Результаты и обсуждение. В северной части Восточно-Европейской алмазоносной провинции коренные месторождения алмазов могут быть выявлены в пределах территорий с Карельским (Балтийский щит), Архангельским и Онежским (Русская плита) типами поисковых обстановок. Они прогнозируются в пределах структур, отличающихся благоприятными структурно-тектоническими, минералогическими, фациально-динамическими факторами и особенностями глубинного строения [7, 42, 43].

На территории с Карельским типом поисковой обстановки могут быть обнаружены алмазоносные магматиты широкого возрастного диапазона – от архея до фанерозоя. Среди коренных источников алмазов, которые могут являться потенциальными месторождениями, на территории Балтийского щита установлено два основных типа (разновидности) тел, отличающихся возрастом, вещественным составом, уровнем эрозионного среза и другими особенностями: Кимозерский и Финский. В пределах Русской плиты, на закрытых площадях, выделяются погребенные трубки Архангельского типа.

Трубки Кимозерского типа (*первая разновидность*), среди которых могут быть выявлены месторождения алмазов с низкими или средними содержаниями, сопоставляются нами с телом Кимозеро (см. таблицу). Тела этого типа могут быть представлены нормальными диатремами или узкими подводящими каналами и широкими маарообразными шляпами. Алмазоносные кимберлиты отличаются своеобразным составом ИМК, среди которых доминируют хромшпинелид и марганцовистый ильменит, в незначительных количествах присутствуют пироп и хромдиопсид. Изученное авторами тело Кимозеро [7] представлено блюдцеобразной залежью весьма значительных размеров (2,0×0,8 км) и узкими подводящими каналами, что сближает кимозерский комплекс с телами сходного строения [44, 45], которые условно выделены в саскачеванский морфотип кимберлитов [46].

По аналогии с ними и на основании ряда общих петрографических особенностей (наличие пирокластики и амебовидных автолитов, редкость фрагментов вмещающих толщ, локальные явления переотложения отлагавшегося материала) Кимозерские кимберлиты рассматриваются как продукты субаэральных вулканических выбросов, которые были исторгнуты из жерл палеовулкана в несколько эруптивных фаз. После консолидации кимберлиты подверглись захоронению и изменению, в том числе метаморфизму. По аналогии с другими кимберлитовыми телами и учитывая, что изученный комплекс выполнен образованиями, которые принято считать кратерными отложениями, можно предполагать крайне незначительный эрозионный срез тела, измеряемый всего лишь десятками метров [19]. Специфика Карело-Кольской алмазоносной субпровинции заключается отчасти в том, что здесь в пределах проторифтогенных прогибов вероятно обнаружение древних слабоэродированных кимберлитовых тел. Ореолы рассеяния ИМК заключены в четвертичных отложениях основной морены и прослеживаются на расстояние первых километров от источника [8]. Возможен перенос кимберлитовых минералов во флювиальных условиях и на умеренные расстояния (первые десятки километров). В составе древних потенциальных коллекторов алмазов наиболее высокая вероятность выявления ИМК связана с отложениями палеодельт.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318 DOI: 10.31897/PMI.2022.49
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

Поисковые модели коренных месторождений алмазов севера Восточно-Европейской платформы

Критерии		Поисковые модели		
		Кимозерская	Финская	Архангельская
Геологические	Морфология тел и размеры*	Трубки (мелкие, средние, крупные, уникальные)	Трубки (мелкие, средние), жилы, дайки, штокверки	Трубки (мелкие, средние, крупные, уникальные), силлы
	Возраст	PR_1	PR-PZ	PZ_2
	Эрозионный срез**	Низкий и умеренный	Умеренный (?)	Низкий (сохраняются кратерные фации)
	Мощность перекрывающих отложений (возраст)	Чаще 0-20 м (Q), реже 20-60 м (Q), может достигать 200 м (Q)	Чаще 0-20 м (Q), реже 20-60 м (Q), может достигать 200 м (Q)	До 200 м (C, Q)
	Состав пород верхней части КВЦ (возраст)	Породы кристаллического фундамента (AR-PR_1)	Породы кристаллического фундамента (AR-PR_1)	Песчаники, алевролиты, аргиллиты (PR_2), терригенные и карбонатные породы (PZ_1)
	Прогнозно-поисковый тип трубки	Слабосрезанные тела с локальным шлейфом ИМК	Умеренно срезанные тела с площадным шлейфом ИМК; сильносрезанные тела с региональным шлейфом ИМК	Слабосрезанные тела с локальным шлейфом ИМК
	Тип поисковой обстановки	Карельский	Карельский, Онежский	Архангельский, Онежский
Структурные	Локальные структуры	Зоны складчато-разрывных дислокаций; глубинные разломы	Отрицательные структуры, выраженные в рельефе (часто под озерами); глубинные разломы	Мульды проседания околотрубочного пространства; усложнения структуры подошвы свит в верхней части КВЦ; рудоконтролирующие разломы (совпадают с длинными осями трубок)
Минералогические и петрографические	Типы пород	Кимберлиты, лампроиты	Кимберлиты, лампроиты	Кимберлиты (магнезиальные и железисто-магнезиальные)
	Минеральные ассоциации ИМК	Пироп-хромшпинелидовая	Пироп-хромшпинелидовая, пироп-пикроильменитовая	Магнезиальный тип: хромдиопсид-пироп-хромшпинелидовая (до 10-15 г/т – кратерная фация, до 30 г/т – диатремовая фация); железисто-магнезиальный тип: пироп-пикроильменитовая (800-3000 г/т – кратерная фация, 10000 г/т – диатремовая фация)
	Параметры алмазоносности (установленные и ожидаемые)	Низкая, средняя	Низкая, средняя	Низкая, средняя, высокая
Проявление в ореолах рассеяния ИМК	Генетические типы ореолов (возраст)	Моренные, флювиогляциальные, аллювиальные, делювиальные, элювиальные (Q); в протерозойских прогибах предполагаются дельтовые (PR_1)	Моренные, флювиогляциальные, аллювиальные, делювиальные, элювиальные (Q); аллювиальные, элювиально-делювиальные, пляжевые (C_{1-2}); озерные кратерных впадин (D_3-C_1)	Моренные, флювиогляциальные, аллювиальные, делювиальные (Q); аллювиальные, делювиальные, пляжевые (C_{1-2}); озерные кратерных впадин (D_3-C_1)
	Суммарная дальность переноса ИМК от коренных источников	Ближняя, умеренная	Ближняя, умеренная, дальняя	Ближняя, умеренная
	Содержание ИМК I-II кл. износа в ореолах ближнего переноса (зн./пробу)	Сотни	Десятки, сотни, реже тысячи	От трубок магнезиальных кимберлитов: первые зн./пробу, реже десятки; от трубок железисто-магнезиальных кимберлитов: десятки-сотни
	Размер минералогической аномалии по ИМК I-II кл. износа: 1 – бассейновые отложения; 2 – континентальные отложения	1 – не установлена; 2 – 6-10 км^2 – в четвертичных основных моренах	1 – в пределах площади трубки и ближайшего окружения; 2 – до 2-3 км^2 – в четвертичных основных моренах	1 – в пределах площади трубки и ближайшего окружения; 2 – от 1-2 до 12-16 км^2 – в отложениях палеозоя и в базальных горизонтах четвертичных отложений; аномалия может отсутствовать

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Окончание таблицы

Критерии		Поисковые модели		
		Кимозерская	Финская	Архангельская
Проявление в геофизических полях	Магниторазведка	Положительные аномалии от десятков до 3000 нТл в зависимости от разновидности кимберлита	Положительные аномалии от десятков до сотен нТл. Широко распространены аномалии аналогичной интенсивности некимберлитовой природы	Положительные аномалии от единиц до десятков нТл. При наземной съемке аномалии от кимберлитов магнезиального типа часто распадаются на мелкие экстремумы разного знака. Кимберлиты железисто-магнезиального типа более однородны по строению и составу, аномалии над ними при наземной съемке, как правило, не распадаются
	Гравиразведка	Не установлено	Отрицательные аномалии разной интенсивности	Не проявляются
	Электроразведка	Аномалии кажущегося сопротивления от единиц до 1000 Ом·м (в зависимости от разновидности кимберлита) на фоне вмещающих пород с сопротивлением до десятков тысяч Ом·м	Аномалии кажущегося сопротивления от единиц до десятков Ом·м на фоне вмещающих пород с сопротивлением до тысяч Ом·м	Аномалии кажущегося сопротивления 10-150 Ом·м на фоне вмещающих пород с сопротивлением до 500 Ом·м

[*] Размеры трубок: мелкие – менее 10 тыс. м^2, средние – 10-100 тыс. м^2, крупные – 100-250 тыс. м^2, уникальные – более 250 тыс. м^2 (по В.М.Подчасову [47]). [**] Эрозионный срез: низкий – до 200-250 м, умеренный – до 1000 м, высокий – более 1000 м.

Узкие диатремовые каналы кимозерского проявления с диаметром на поверхности около 30-40 м (рис.2) прорывают как вмещающие долериты, так и пластообразные залежи, сложенные кимберлитами. Каналы обнажаются на поверхности в виде выходов изометричной формы [7]. Разрез пород, слагающих пластообразную залежь тела, имеет сложное трехслойное строение [6]. Верхний горизонт (15-20 м) образован углеродистым кимберлитом, средний (до 10 м) невыдержанными магнетит-серпентин-тремолитовыми («магнетитовыми») кимберлитами, отличающимися повышенным содержанием магнетита. Нижняя часть разреза пластообразной залежи (10-20 м) сложена нормальным флогопит-карбонат-серпентиновым кимберлитом без явных отличительных особенностей. Все основные типы этих горных пород находят отражение в магнитном и электрическом полях. Причем каждому из них соответствуют вполне определенные характеристики названных полей, свой «геофизический образ» [48]. «Магнетитовый» горизонт фиксируется аномально высоким магнитным полем. Максимальная амплитуда аномалии более 3000 нТл наблюдается в правой части показанного профиля, где он имеет наибольшую мощность и размеры по горизонтали. Напомним, что этот горизонт не выдержан по площади и соответственно не все тело отражается столь контрастной аномалией, а только его отдельные фрагменты. По-видимому, именно этот наиболее крупный выход «магнетитового» горизонта в северо-восточной части тела фиксируется аэромагнитной съемкой аномалией интенсивностью порядка 340 нТл. По электрическому сопротивлению «магнетитовый» горизонт характеризуется относительно высокими абсолютными значениями ρ_k около 1000 Ом·м, но на фоне вмещающих долеритов с сопротивлением в десятки тысяч и более Ом·м подобные объекты можно считать проводниками.

«Углеродистый» горизонт (ПК 50-200, рис.2) характеризуется аномально низким электрическим сопротивлением менее 10 Ом·м на фоне высокоомных долеритов с сопротивлением в десятки тысяч Ом·м. В магнитном поле «углеродистый» горизонт проявляется относительно слабо. Однако при детальном рассмотрении он все же отличается от долеритов более высокими значениями и сглаженной частотной характеристикой магнитного поля: граница долерит – кимберлит отчетливо фиксируется в районе ПК 50. Эти детали магнитного поля были зафиксированы с помощью квазинепрерывной съемки с цикличностью измерений 1 с, что в среднем соответствовало шагу съемки около 1 м.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318
DOI: 10.31897/PMI.2022.49
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

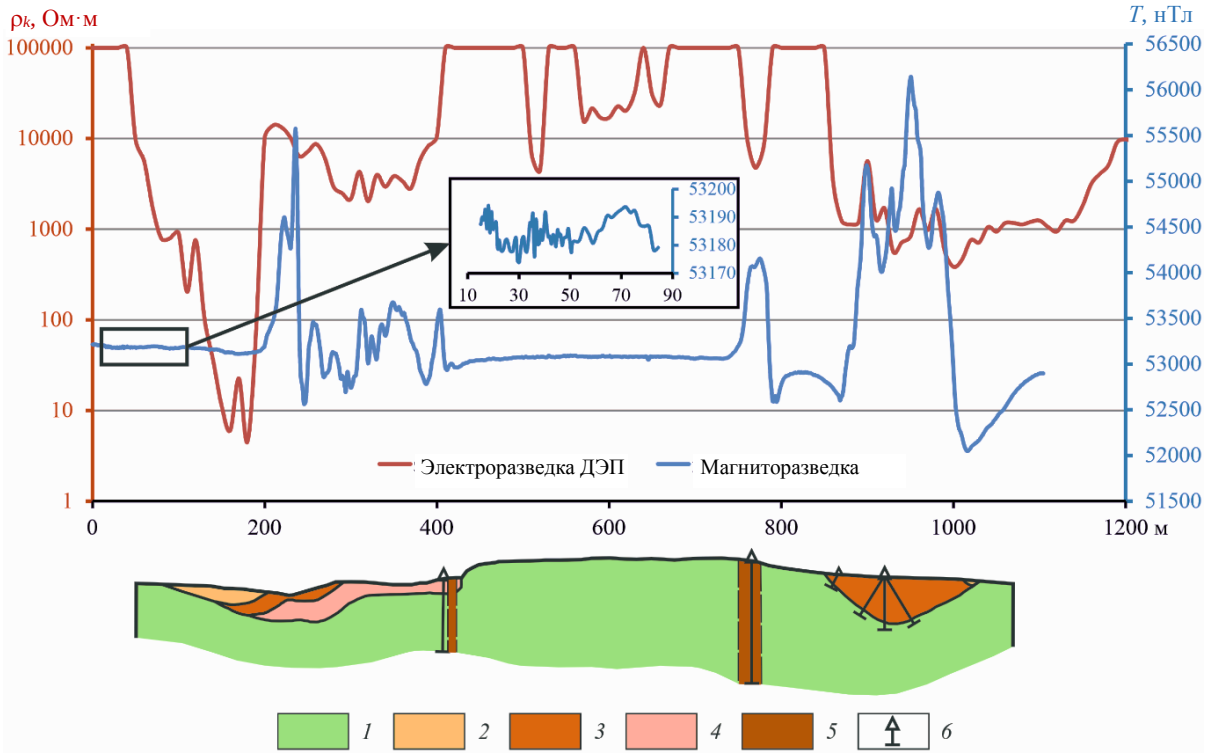


Рис.2. Поисковая модель Кимозерского типа: геолого-геофизический разрез через кимберлитовое тело Кимозеро по данным наземных геофизических работ

1 – габбродолериты; *2* – углеродистые кимберлиты; *3* – магнетит-серпентин-тремолитовые («магнетитовые») кимберлиты; *4* – флогопит-карбонат-серпентиновые кимберлиты; *5* – диатремовые каналы: флогопит-серпентиновые порфировые слюдяные кимберлиты и кимберлитовые брекчии; *6* – буровые скважины

«Нормальный» кимберлит характеризуется изрезанным магнитным полем с резкими перепадами значений до ±500 нТл. Электрическое сопротивление, по данным электроразведки, составляет около 2000 Ом·м. Обе характеристики позволяют уверенно выделить этот тип кимберлита на фоне вмещающих пород. Подводящие каналы (ПК 770 и ПК 400, рис.2) контрастно выделяются аномалиями магнитного поля с амплитудами 1000 и 500 нТл соответственно. Один более крупный канал выделяется также по данным электроразведки. Более мелкий – находится в краевой области пониженных значений ρ_k, но локальной аномалии не наблюдается, возможно, из-за его малых размеров и/или влияния «нормального» кимберлита, который этот канал прорывает. Детальная гравиразведка в пределах участка Кимозеро не проводилась, но морфология и небольшая мощность пластообразных залежей кимберлитов, а также малые размеры подводящих каналов не позволяют рассчитывать на выявление локальных аномалий поля силы тяжести.

Трубки Финского типа (*вторая разновидность*) могут быть обнаружены в пределах Балтийского щита и в области его сочленения с Русской плитой. Они представлены, как правило, небольшими (площадь до первых гектаров) диатремами, примерами которых являются тела в пределах полей Каави-Куопио, Куусамо Южный и Куусамо Северный. Они сложены алмазоносными кимберлитами группы I полиминерального состава ИМК с преобладанием пиропов и пикроильменитов, реже слюдистыми кимберлитами группы II пироп-хромшпинелидового состава или оливиновыми лампроитами. Трубки характеризуются отсутствием кратерных фаций и более значительным эрозионным срезом по сравнению с телами Кимозерского типа.

Тела Финского типа проявляются различными по форме и протяженности ореолами рассеяния ИМК в перекрывающих четвертичных отложениях. В образованиях основной морены мощностью до 15-20 м они прослеживаются неизношенными или слабоизношенными (I-II классы) зернами кимберлитовых минералов на расстоянии около 1,5-2,0 км от коренного источника [49]. Чешуйчатые морены могут выводить ИМК на дневную поверхность. По мнению М.Тайни [50], некоторые кимберлитовые трубки могут вообще не иметь ореола рассеяния ближнего переноса.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.49

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

В случаях, когда ИМК транспортируются ледниковыми или речными водами, образуются потоки рассеяния протяженностью до 30 км или более. Контрастность и протяженность ореола зависит в первую очередь от условий формирования отложений, перекрывающих искомый объект, и от содержания кимберлитовых минералов в породах первоисточника.

Известные кимберлитовые и лампроитовые тела Финского типа, как правило, отражаются в магнитном поле положительными аномалиями. Интенсивность аномалий колеблется в широких пределах: от единиц до сотен нТл. Однако более интенсивные аномалии, чем от кимберлитов, могут быть связаны с породами зеленокаменных поясов и силлами габбро. Так, в пределах кимберлитового поля Каави-Куопио так же, как и в поле Куусамо Южный, имеется множество аномалий, сопоставимых по амплитуде или более интенсивных, чем от кимберлитовых трубок. Кроме того, магнитная восприимчивость вмещающих пород, представленных преимущественно гранитогнейсами или кварцитами, может достигать сотен 10^{-5} СИ (данные Геологической службы Финляндии), что перекрывает диапазон изменения магнитной восприимчивости алмазоносных пород. Несмотря на эти осложняющие факторы, практически все трубки Финского типа были найдены с помощью магнитной съемки.

Например, в кимберлитовом поле Куусамо Южный при заверке магнитных аномалий были открыты две кимберлитовые трубки: Каттаисенваара и Калеттоманпуро (рис.3). Первая, по

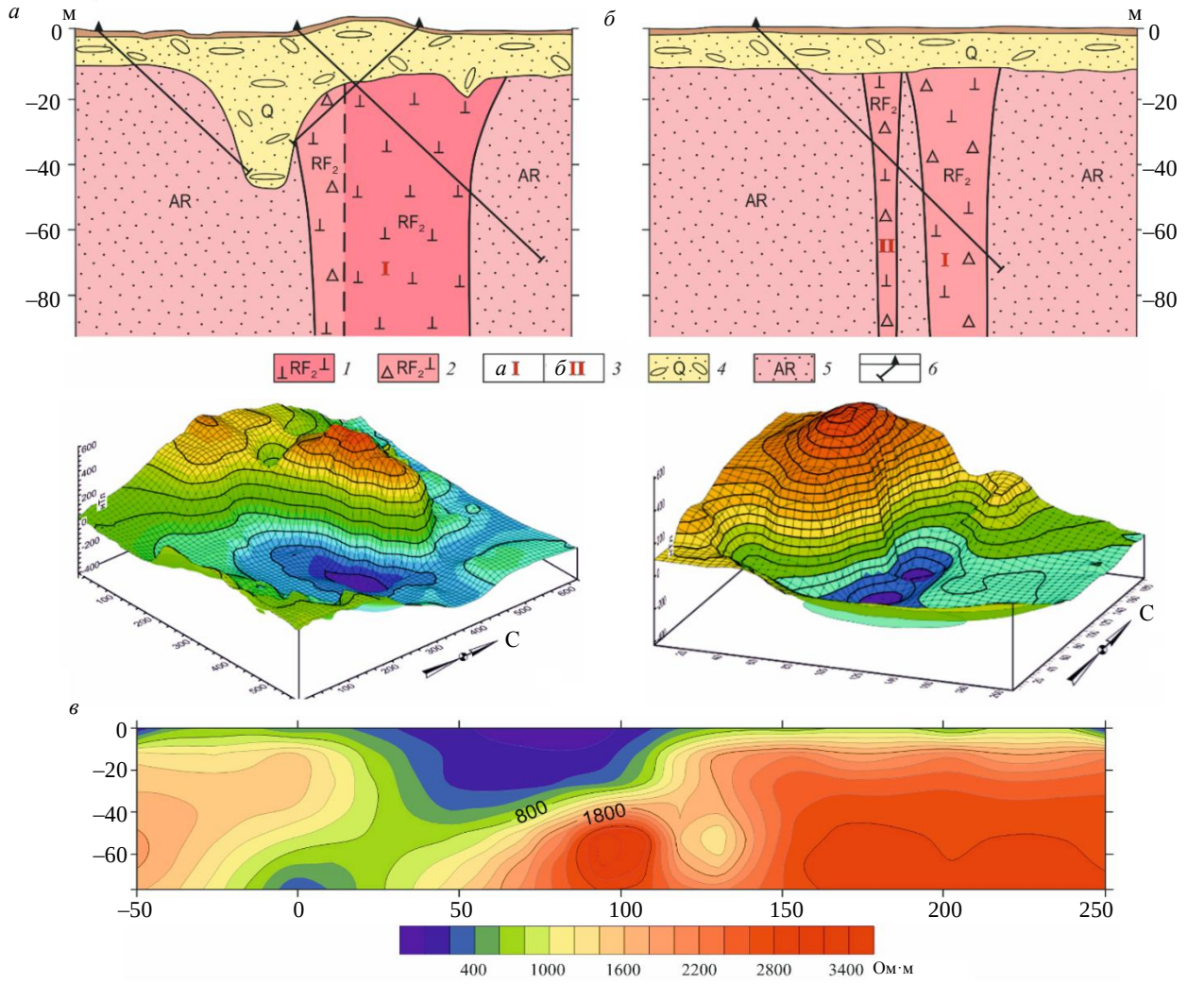


Рис.3. Поисковая модель Финского типа: геологические разрезы и магнитное поле по данным наземной съемки по трубкам Каттаисенваара (*а*) и Калеттоманпуро (*б*) поля Куусамо Южный и геоэлектрический разрез трубки 21 поля Каави-Куопио (*в*) ([7, 11, 51], с дополнениями и материалами компании «Санрайз Даймондс» [52])

1, 2 – породы, слагающие кимберлитовую трубку: *1* – гипабиссальный кимберлит, *2* – кимберлитовая брекчия; *3* – кимберлиты: *а* – группы I, *б* – группы II; *4* – четвертичные ледниковые отложения; *5* – архейские гнейсы; *6* – скважины колонкового бурения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

данным аэромагнитной съемки, выделяется аномалией шириной 180 м и интенсивностью 600 нТл (рис.3, *а*). Трубка Калеттоманпуро фактически представляет собой два тела, представленные кимберлитами группы I и II (рис.3, *б*). Породы группы II лишь немного более магнитны, чем вмещающие, и не выделяются как отдельное магнитное тело. По данным компании «Арктик Стар» (Канада), оливиновые лампроиты поля Куусамо Северный обладают магнитным, электромагнитным и гравитационным аномальным откликом.

В поле Куусамо Северный на фоне магнитных пород фундамента компанией European Diamonds Plc в 2005 г. были обнаружены оливиновые лампроиты, слагающие трубки Черный Волк и Белый Волк. Интересно отметить, что открытая позже трубка Серый Волк, судя по материалам компании «Арктик Стар», в магнитном поле не выделяется, но, по сравнению с другими трубками, она значительно контрастнее проявляется в поле силы тяжести.

Исследования специалистов Геологической службы Финляндии показали, что электрическое сопротивление пород архея колеблется от нескольких тысяч до более 30000 Ом·м, причем значения в первые десятки тысяч наиболее распространены. А сопротивление кимберлитов, согласно источнику [53], может меняться от 5 до 700 Ом·м, где максимальные значения встречаются редко и характерны для глубоких горизонтов трубок. При всех возможных колебаниях электрического сопротивления кимберлитов, лампроитов и вмещающих пород наблюдается многократное различие между трубками Финского типа.

По данным Ю.В.Короткова (2011), проводившего работы методом переходных процессов на нескольких кимберлитовых трубках поля Каави-Куопио, они относятся к категории хорошо проводящих относительно вмещающих пород (рис.3, *в*). Результаты этих работ опубликованы в отчете совместного предприятия компаний «Санрайз Даймондс» и «Нордик Даймондс» [52]. Кимберлиты фиксируются контрастной аномалией, в пределах которой электрическое сопротивление в десятки раз ниже, чем у вмещающих пород. При этом как в плане, так и в разрезе отчетливо проявляются элементы морфологии кимберлитового тела.

Трубки Архангельского типа (*третья разновидность*) прогнозируются на закрытых территориях Русской плиты. На таких территориях могут быть выявлены слабоэродированные кимберлитовые тела, сопровождаемые локальным шлейфом рассеяния ИМК в терригенных коллекторах. В подобных обстановках формирование значительно перемещенных от коренных источников россыпей алмазов невозможно, а сами тела выражаются крайне слабо как в геофизических полях, так и в малоконтрастных шлиховых ореолах. Выявление тел кимберлитов и родственных пород на таких площадях весьма сложно и требует использования разнообразного комплекса геолого-геофизических, геохимических и других методов. Характерными примерами трубок Архангельского типа являются месторождения алмазов им. М.В.Ломоносова и им. В.П.Гриба. Обобщающими исследованиями установлено, что промышленно-алмазоносные тела характеризуются рядом особенностей (см. таблицу). Чаще всего они представлены погребенными трубками, состоящими из хорошо сохранившейся диатремы и кратерной части (рис.4). Локальный структурный контроль тел определяется приуроченностью к рудовмещающим разломам, совпадающим с длинными осями тел, мульдами проседания и усложнениями структуры подошвы свит верхней части КВЦ. Наличие или отсутствие хорошо выраженного кратера в ряде трубок объясняется не только особенностями их первоначального строения, но и величиной эрозионного среза. Она могла быть выше у тел, сформированных на начальном этапе среднепалеозойской тектономагматической активизации [54]. Больший срез некоторых трубок хорошо увязывается с наличием фонового минералогического шлейфа кимберлитовых минералов, представленного зернами IV и V классов износа, вероятнее всего поступавших из коренных источников ранней стадии внедрения.

Архангельский тип трубок представлен железисто-магнезиальными (месторождение им. В.П.Гриба) и магнезиальными (месторождение им. М.В.Ломоносова) кимберлитами. Содержания ИМК в них отличаются в десятки и сотни раз. Коренные источники алмазов железисто-магнезиального типа проявляются в коллекторах более контрастными континентальными ореолами рассеяния ближнего переноса с более высокими содержаниями ИМК I и II классов износа (рис.4). Магнезиальные кимберлиты проявляют себя в ореолах весьма слабо, и даже единичные неизношенные и слабоизношенные зерна высокобарических минералов могут свидетельствовать о близости источника. Погребенные минералогические аномалии от трубок Архангельского типа

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.49

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

прослеживаются в континентальных палеообстановках каменноугольного времени на расстоянии не более 2 км от источника в направлении вектора переноса. Площадь минералогической аномалии, представленной ореолом рассеяния ИМК I и II классов износа, варьируется от 1-2 до 16 км^2. Коренные источники могут проявляться и в древних пляжевых ореолах, но только в том случае, если они располагаются в непосредственной близости от трубки.

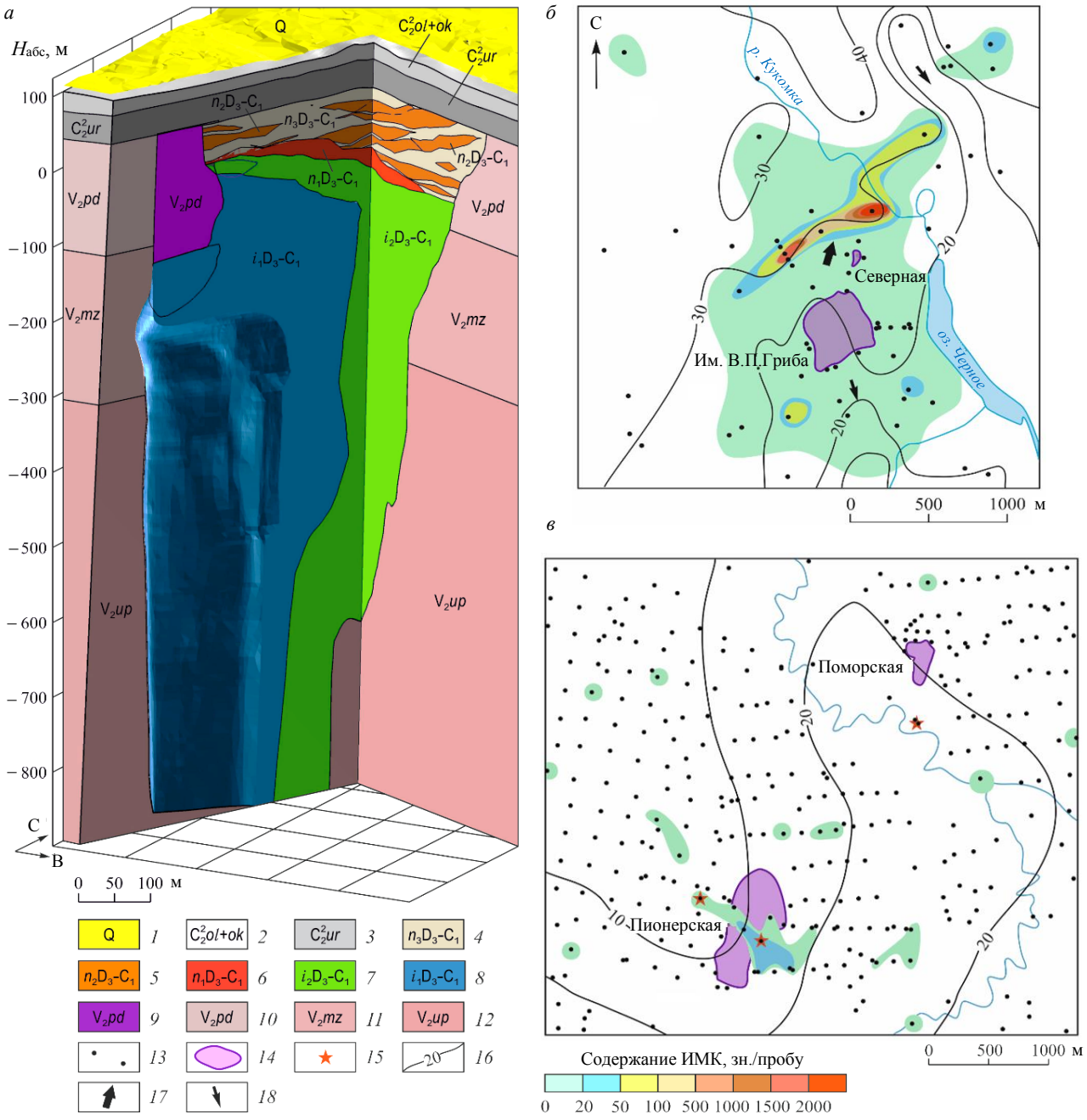


Рис.4. Разрез трубки Архангельского типа на примере месторождения им. В.П.Гриба (*а*) и строение ореолов рассеяния ИМК ближнего переноса (I-II классы износа) в каменноугольных континентальных отложениях от кимберлитовых тел железисто-магнезиальной (*б*) и магнезиальной разновидностей (*в*) ([7, 55], с дополнениями)

1-3 – отложения, перекрывающие кимберлитовую трубку: *1* – четвертичные, *2* – олмугско-окуневская свита, *3* – урзугская и воеречен-ская свиты объединенные; *4-6* – породы кратерной части: *4* – песчаники и туфопесчаники, *5* – туфопесчаники, туффиты и туфы, *6* – туфы, туффиты; *7, 8* – породы жерловой части (последовательность внедрения): *7* – автолитовая кимберлитовая брекчия и порфировый кимберлит (завершающая), *8* – ксенотуфобрекчия и туфобрекчия (начальная); *9* – зона дезинтегрированных песчаников; *10-12* – вмещающие породы позднепротерозойского кимберлитовмещающего цоколя, свиты верхнего венда: *10* – падунская, *11* – мезенская, *12* – усть-пинежская; *13* – места отбора шлиховых проб (из керна скважин); *14* – кимберлитовые тела; *15* – находки алмазов в шлиховых пробах; *16* – изогипсы реконструированного среднекаменноугольного рельефа, м; *17, 18* – направления переноса ИМК: *17* – в раннем и *18* – среднем карбоне

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318
DOI: 10.31897/PMI.2022.49
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

Практически все известные кимберлитовые тела Архангельского типа открыты в результате заверки магнитных аномалий. По данным аэромагнитной съемки, они отражаются, как правило, положительными аномалиями магнитного поля так называемого трубочного типа. Так, кимберлитовые трубки месторождения им. М.В.Ломоносова отчетливо проявляются в локальной составляющей поля (рис.5). Амплитуда значений магнитной индукции от кимберлитовых тел в большинстве случаев лежит в пределах от единиц до десятков нТл. При наземной магнитной съемке многие аномалии приобретают сложную форму, «распадаются» на несколько экстремумов, и определить эпицентр аномалии затруднительно. Если, например, на трубке Ломоносовская аномалия, по данным наземной съемки, хоть и смещена относительно центра трубки, но все же находится в ее контуре, то на трубке Архангельская максимум приурочен к краевой части тела и выходит за его пределы (рис.5). Показательно, что над отдельными блоками тела наблюдаются отрицательные значения локального магнитного поля. Вполне возможно, что существуют тела, полностью сложенные подобными кимберлитами с соответствующим отражением в магнитном поле. Поэтому при поисках трубок (и месторождений) Архангельского типа наземная магнитная съемка далеко не всегда решает задачу детализации аэромагнитной аномалии. Подобные примеры не единичны, и в таких случаях по результатам наземных работ контуры тела и, соответственно, точки заложения буровых скважин вряд ли могут быть определены.

Более того, в результате разбраковки аэроаномалий только наземной магнитной съемкой некоторые из них вообще могут быть признаны бесперспективными и не заслуживающими дальнейшего

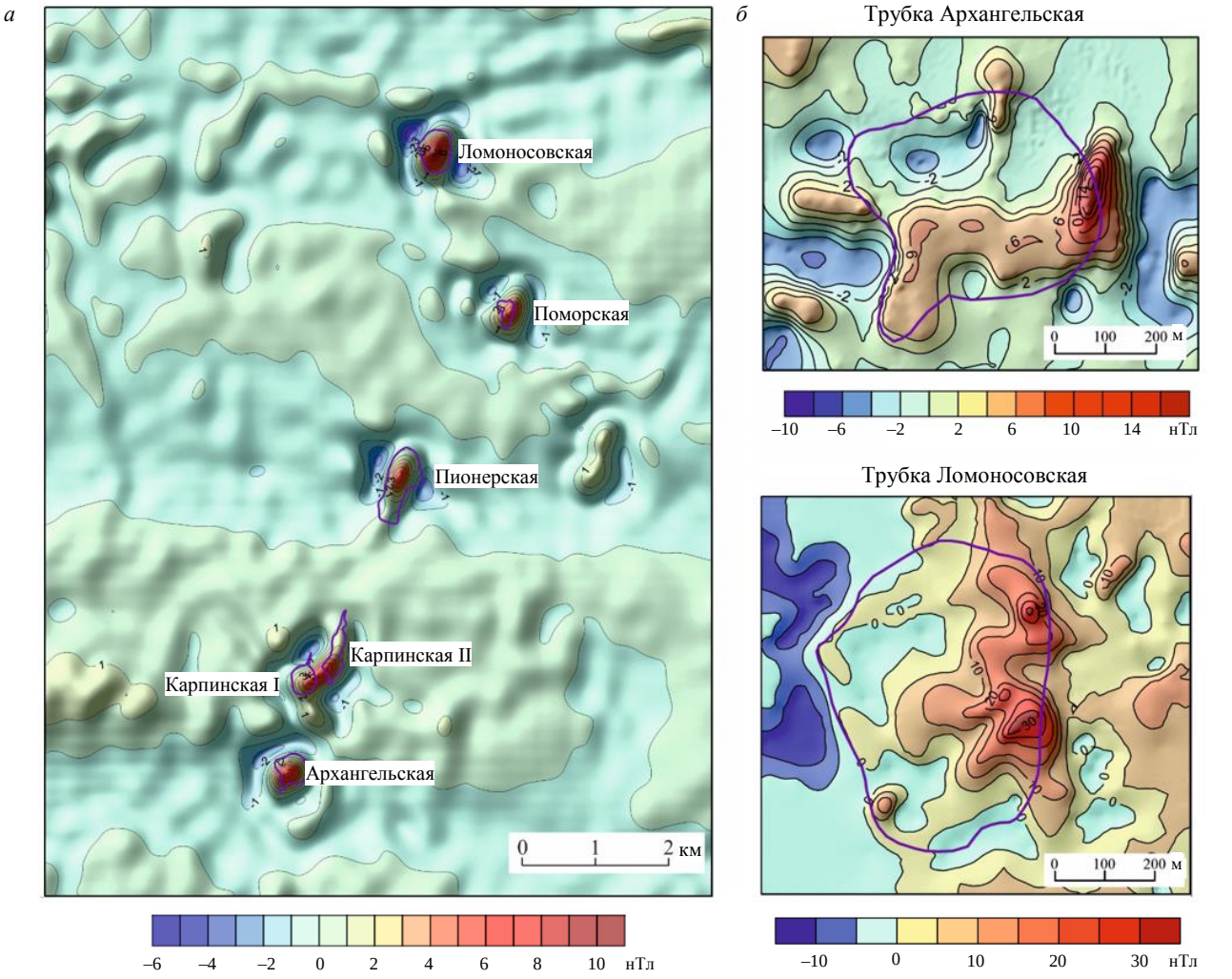


Рис.5. Локальное магнитное поле в районе месторождения им. М.В.Ломоносова по данным аэромагнитной съемки (*а*) и магнитное поле по данным наземной магнитной съемки на кимберлитовых трубках Архангельская и Ломоносовская (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.49

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

изучения или заверочные скважины будут заданы не там, где надо. Подобная история имела место на трубке им. В.П.Гриба, где по данным наземной магнитной съемки в 1987 г. была пробурена скв. 906 в 150 м от трубки (рис.6). Впоследствии месторождение им. В.П.Гриба было открыто только в 1996 г. в результате комплексных ревизионных работ, а скв. 441/1, вскрывшая кимберлит, задавалась по данным электроразведки [56]. При этом аэромагнитная съемка, проведенная в 1984-1985 гг., зафиксировала над трубкой слабоинтенсивную, но вполне распознаваемую положительную аномалию (рис.6). Амплитуда значений аэроаномалии в зависимости от методики обработки данных колеблется, но не превышает 4 нТл. В магнитном поле, по данным наземной магнитной съемки, выделяются два эпицентра. Один из них с амплитудой 15 нТл совпадает с эпицентром аэромагнитной аномалии и находится в контуре трубки. Другой, с амплитудой более 30 нТл, где была пробурена скв. 906, лежит за пределами тела и по аэроданным не проявляется. Предположим, что второй эпицентр обусловлен приповерхностным объектом и с трубкой не связан.

Магниторазведка долгое время оставалась практически единственным геофизическим методом при поисках кимберлитов в Зимнебережном алмазоносном районе. Статистика показывает [57], что в начале 1980-х годов эффективность заверки магнитных аномалий на территории Зимнего берега составляла 20 %, в конце 1980-х гг. – 12,5 %, в 1990-е годы – уже менее 1 %, а в первое десятилетие XXI в. – менее чем 0,5 %. Главным образом это связано с тем, что относительно контрастные аномалии магнитного поля уже выделены и заверены, и в настоящее время интенсивность возможных перспективных аномалий приближается к уровню геологических помех. В связи с этим в целях повышения эффективности поисков все шире внедряется электроразведка, в частности метод переходных процессов (МПП). Работы МПП, проведенные на кимберлитовых трубках Зимнебережного алмазоносного района, показали, что кимберлиты фиксируются контрастными аномалиями проводимости. В качестве примеров приведем геоэлектрические разрезы трубок Пионерская (рис.7, *а*) и Северная (рис.7, *б*). Несмотря на малые размеры трубки Северная (50×100 м), она уверенно выделяется аномалией проводимости по данным МПП с петлей 50×50 м.

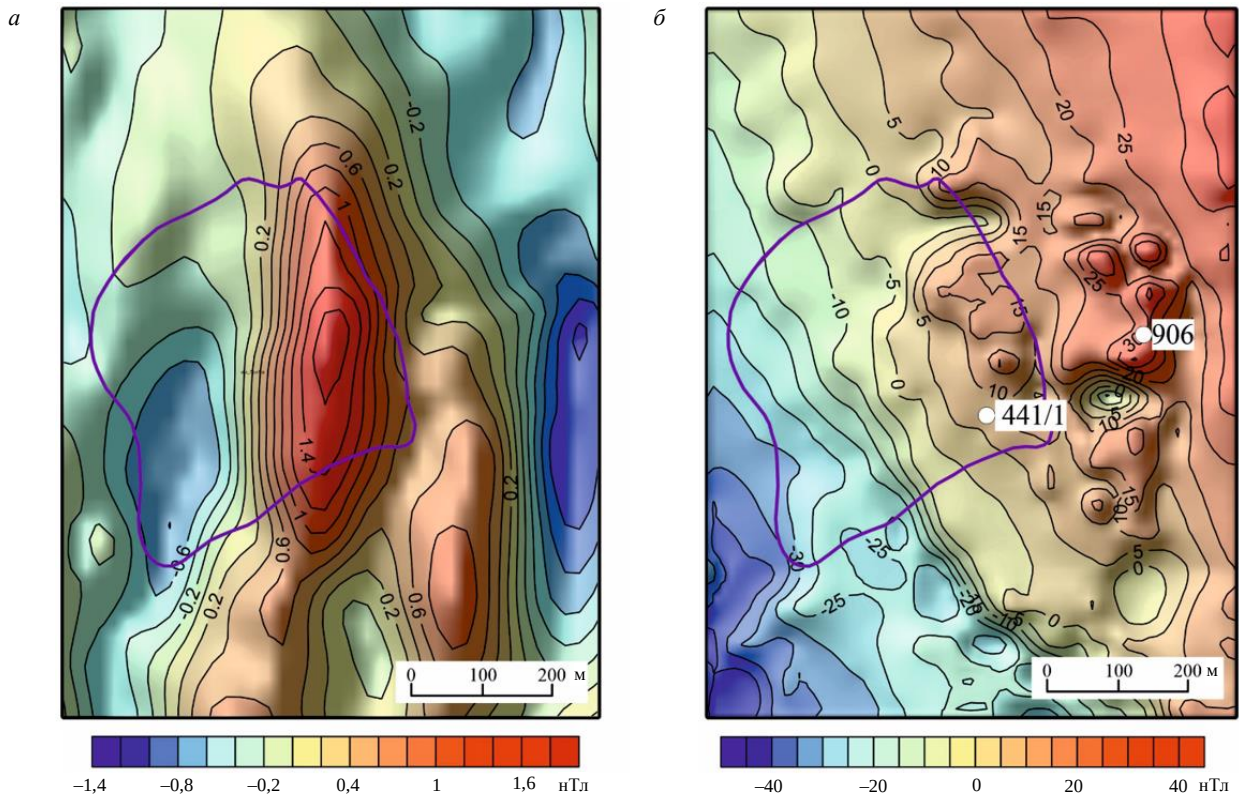


Рис.6. Магнитное поле над кимберлитовой трубкой им. В.П.Гриба по данным аэромагнитной (*а*) и наземной (*б*) съемок

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318
DOI: 10.31897/PMI.2022.49
© В.Н.Устинов, И.И.Микоев, Г.Ф.Пивень, 2022

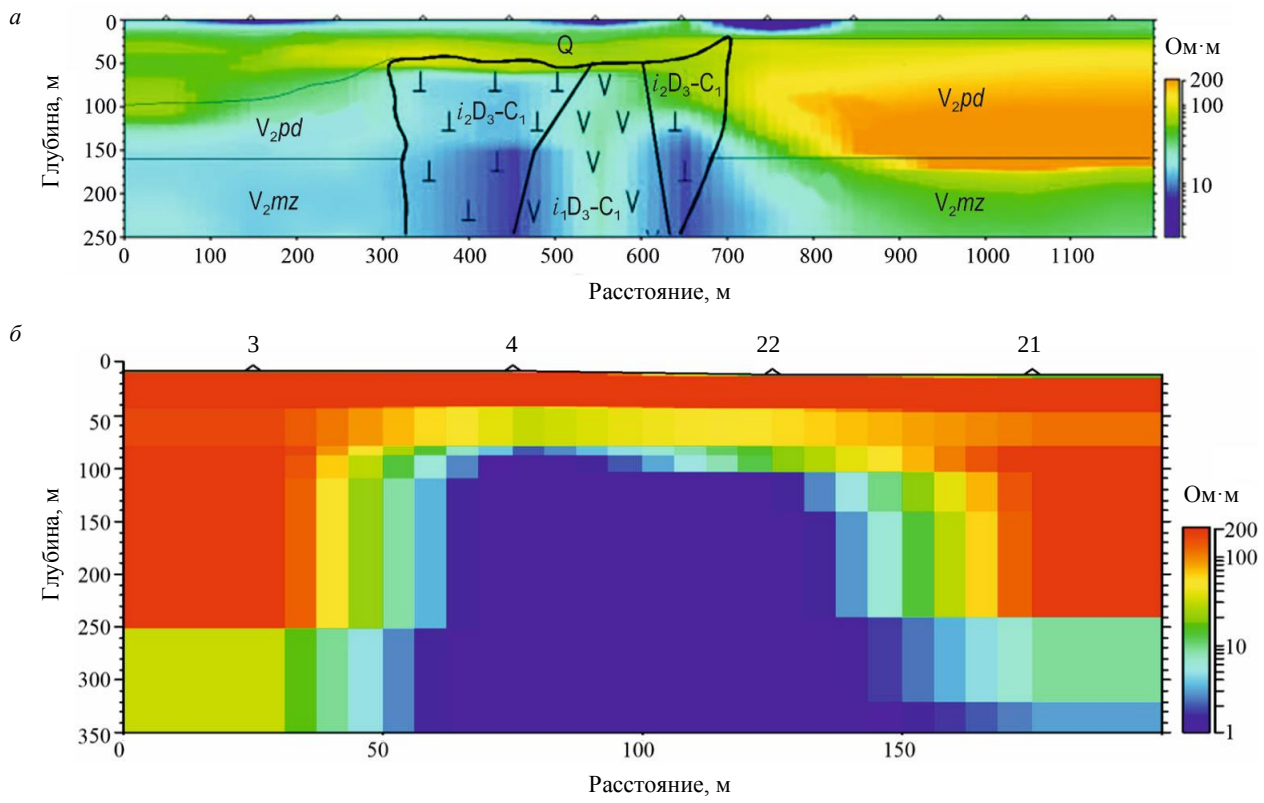


Рис.7. Геоэлектрические разрезы по данным МПП трубок Ломоносовская (*а*), Северная (*б*) ([7, 58], с дополнениями)

Особенности проявления трубок Архангельского типа в геофизических полях хорошо согласуются с распределением петрофизических свойств в кимберлитах, вмещающих и перекрывающих образованиях. Результаты изучения этих свойств пород содержатся в многочисленных производственных отчетах и обобщены в публикациях [59-61]. Проанализированные результаты этих исследований показали, что перекрывающие кимберлитовые трубки четвертичные отложения и отложения среднего карбона характеризуются широким спектром изменения физических свойств. Среднее значение магнитной восприимчивости для них составляет $20\text{-}40\cdot10^{-5}$ ед. СИ. Однако встречаются участки с общим повышенным фоном до $100\cdot10^{-5}$ СИ, а в некоторых прослоях значения достигают сотен и даже тысяч ед. СИ$\cdot10^{-5}$. Кимберлитовмещающие вендские отложения в целом слабомагнитны: магнитная восприимчивость составляет в среднем $25\cdot10^{-5}$ ед. СИ.

Анализ и обобщение имеющейся информации по геофизическим исследованиям скважин и петрофизическим особенностям кимберлитов магнезиального и магнезиально-железистого типов позволяют выявить их некоторые отличия. Породы кратерной части кимберлитовых трубок магнезиального типа, примером которого является месторождение им. М.В.Ломоносова, представлены туфогенно-осадочными образованиями. Их магнитная восприимчивость в целом, как правило, выше, чем у вмещающих пород, и достигает в некоторых прослоях 100 и более 10^{-5} ед. СИ. Жерловые части трубок представлены туфобрекчиями и ксенотуфобрекчиями, характеризующимися повышенной магнитной восприимчивостью, составляющей в среднем $80\text{-}100\cdot10^{-5}$ ед. СИ. Для автолитовой брекчии характерно более низкое значение $\chi = 40\text{-}60\cdot10^{-5}$ ед. СИ. Наблюдается тенденция возрастания магнитной восприимчивости кимберлитов обеих фаз с глубиной. Максимальной магнитной восприимчивостью, достигающей $2700\cdot10^{-5}$ ед. СИ, характеризуются порфировые кимберлиты, выполняющие подводящие каналы. Наглядным примером отражения свойств кимберлитов в магнитном поле может служить трубка Ломоносовская. Здесь ксенотуфобрекчии слагают юго-восточную, а автолитовые брекчии – северную и западную части трубки [62]. Соответственно, по данным наземной магнитной съемки, более высокими значениями поля характеризуется юго-восточная часть трубки, пониженными – северо-западная (см. рис.6). При аэромагнитной съемке отдельные экстремумы, проявляющиеся при наземной съемке, интегрируются,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

влияние приповерхностных магнитных объектов снижается, а глубинных, напротив, увеличивается. Этими факторами, с учетом возрастания магнитной восприимчивости кимберлитов с глубиной, объясняется более однозначное отражение трубок в данных аэромагнитной съемки, чем наземной.

Трубки, сложенные железисто-магнезиальным типом кимберлита, отличаются по петрофизическим параметрам от магнезиальных. Например, по намагниченности в разрезе кратера трубки им. В.П.Гриба выделяются две толщи пород. Верхняя толща мощностью до 70 м характеризуется преобладанием пород с намагниченностью 85-90·10^{-5} ед. СИ, и лишь для отдельных прослоев туфов и туффитов ее значения достигают 100-120·10^{-5} ед. СИ. Породы нижней толщи отличаются повышенной намагниченностью до 100-200·10^{-5} ед. СИ. Выветрелая автолитовая кимберлитовая брекчия в зоне контакта с породами кратера характеризуется слабой намагниченностью 120-150·10^{-5} ед. СИ. Глубже в большинстве скважин выделяется блок кимберлитов со значениями намагниченности до 1200·10^{-5} ед. СИ. Ниже этого блока ее интенсивность уменьшается до 120-300·10^{-5} ед. СИ, а с глубины 410-440 м (по отдельным скважинам) возрастает и достигает значений 2000-2500·10^{-5} ед. СИ, особенно в центральной части жерла. Магнитная восприимчивость туфо-ксенотуфобрекчий варьируется от 100 до 500·10^{-5} ед. СИ, максимальные значения характерны для ксенотуфобрекчий. Намагниченность туфобрекчий 100-250·10^{-5} ед. СИ.

По данным наземной и аэросъемок, положительной магнитной аномалией выделяется восточная часть трубки им. В.П.Гриба, сложенная автолитовой кимберлитовой брекчией (см. рис.6). Западная часть трубки, представленная ксенотуфобрекчией, в магнитном поле не проявляется. Вероятно, это объясняется как более низкой магнитной восприимчивостью, так и значительной примесью немагнитного материала вмещающих пород вендского возраста. Содержание ксенолитов достигает здесь 40-50 %, по составу преобладают аргиллиты и алевролиты. Таким образом, несмотря на наличие в трубке им. В.П.Гриба пород с высокой магнитной восприимчивостью, в магнитном поле трубка проявляется слабо, что объясняется их небольшой мощностью и глубоким залеганием.

Большинство трубок железисто-магнезиального кимберлита Кепинского поля (Степная, Солоха, 840 и др.) сложены ксено- и туфобрекчиями. В магнитном поле они уверенно выделяются положительными аномалиями интенсивностью от единиц до 10-15 нТл, по данным аэромагнитной съемки, и до 30 нТл – по наземной. В отличие от трубок месторождения им. М.В.Ломоносова, по результатам наземной магнитной съемки, аномалии не «распадаются», что объясняется их более простым строением и однородностью слагающих их кимберлитов.

Электрические характеристики кимберлитов магнезиального и железисто-магнезиального типов имеют близкие значения. Сходные параметры отличают также вмещающие и перекрывающие их породы. Удельное электрическое сопротивление кимберлитов составляет 5-30 Ом·м, реже в отдельных блоках, как правило глубинных, до 100 Ом·м. Аналогичные показатели вмещающих пород падунской свиты меняются от 70-200 Ом·м в верхней части разреза до 5-30 Ом·м в нижней его части. Резкое увеличение электропроводности отмечается на глубинах от 100 до 250 м и обусловлено верхней границей сильноминерализованных грунтовых вод. Таким образом, наибольший контраст между кимберлитами и вмещающими породами имеет место в верхней части разреза вмещающих пород.

Средняя плотность вмещающих пород и кимберлитов практически одинакова (2,2-2,4 г/$см^3$). Более низкие значения (2,0-2,2 г/$см^3$) отличают перекрывающие отложения. Следовательно применять гравиразведку при поисках месторождений Архангельского типа в этих условиях нецелесообразно.

Заключение. Анализ геологических, структурных, минералогических и петрографических критериев локального прогноза, а также изучение особенностей проявления кимберлитовых и лампроитовых тел в ореолах рассеяния и геофизических полях дал возможность выделить и охарактеризовать основные модели коренных месторождений алмазов в различных поисковых обстановках севера ВЕП. Наиболее значимые в промышленном плане месторождения связаны с моделью Архангельского типа, разработанной на примерах известных трубок Зимнебережного района. В то же время изучение и обобщение данных по петрофизическим особенностям кимберлитовых, вмещающих и перекрывающих пород, слабый минералогический сигнал, особенно от некоторых тел

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

магнезиальной серии, дает возможность предполагать существование на закрытых территориях Русской плиты кимберлитовых трубок с отсутствием геофизических и минералогических аномалий, что требует разработки новых методов (структурных, дистанционных, геохимических и др.) с целью обнаружения таких месторождений. На основе исследования коренных алмазоносных объектов сформулированы их основные признаки, на которые целесообразно ориентироваться при проведении геологоразведочных работ в пределах Карело-Кольской субпровинции.

Авторы выражают благодарность Н.В.Антоновой (*АЛРОСА*) *и И.С.Галушкиной* (*ЦНИГРИ*), *которые составили иллюстрации для статьи, а также коллегам из Геологической службы Финляндии* (*д-р Х.О'Брайан, д-р М.Лехтонен*) *и компании «Арктик Стар» Канады* (*Бадди Дойл*) *за ценные советы и помощь при написании работы.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *De Wit M.* Identification of global diamond metallogenic clusters to assist // Conference Diamonds Source to Use, 1-3 March 2010, Johannesburg, Botswana / The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010. P. 15-38.

2. *Kopylova M.G., Afanasiev V.P., Bruce L.F. et al.* Metaconglomerate preserves evidence for kimberlite, diamondiferous root and medium grade terrane of a pre-2.7 Ga Southern Superior protocraton // Earth and Planetary Science Letters. 2011. Vol. 312. Iss. 1-2. P. 213-225. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.09.057

3. *Tappe S., Smart K., Torsvik T., Massuyeau M. et. al.* Geodynamics of kimberlites on a cooling Earth: Clues to plate tectonic evolution and deep volatile cycles // Earth and Planetary Science Letters. 2018. Vol. 484. P. 1-14.

4. *Самсонов А.В., Ларионова Ю.О., Сальникова Е.Б. и др.* Изотопная геохимия и геохронология палеопротерозойских метакимберлитов Кимозерского проявления (Центральная Карелия) // Материалы IV Всероссийской конференции «Изотопные системы и время геологических процессов», 2-4 июня 2009, Санкт-Петербург. СПб, 2009. С. 158-161.

5. *Priyatkina N., Khudoley A.K., Ustinov V.N., Kullerud K.* 1.92 Ga kimberlitic rocks from Kimozero, NW Russia: Their geochemistry, tectonic setting and unusual field occurrence // Precambrian Research. 2014. Vol. 249. P. 162-179. DOI: 10.1016/j.precamres.2014.05.009

6. *Ушков В.В.* Кимозерское проявление алмазоносных кимберлитов в Онежской структуре // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2001. № 3. С. 94-98.

7. *Устинов В. Н., Неручев С.С., Загайный А.К. и др.* Алмазоносность севера Восточно-Европейской платформы. СПб: Наука, 2021. 410 с.

8. *Устинов В.Н.* Терригенные коллекторы алмазов Сибирской, Восточно-Европейской и Африканской платформ. СПб: Наука, 2015. 531 с.

9. *O'Brien H.E., Phillips D., Spencer R.* Isotopic ages of Lentiira – Kuhmo – Kostomuksha olivine lamproite – Group II kimberlites // Bulletin of the Geological Society of Finland. 2007. Vol. 79. P. 203-215.

10. *Беляцкий Б.В., Никитина Л.П., Савва Е.В., Левский Л.К.* Изотопные характеристики лампроитовых даек восточной части балтийского щита // Геохимия. 1997. Т. 35. № 6. С. 658-662.

11. *O'Brien H., Bradley J.* New kimberlite discoveries in Kuusamo, northern Finland // 9th International Kimberlite Conference, Frankfurt, Germany. IKC, 2008. Vol. 9. A00346.

12. *O`Brien H.E., Tyni M.* Mineralogy and geochemistry of kimberlites and rocks from Finland // 7th International Kimberlite Conference. Cape Town, Republic of South Africa. Red Roof Design, 1999. Vol. 2. P. 643-645.

13. *Capdevila R., Arndt N., Letendre J., Sauvage I.F.* Diamonds in volcaniclastic komatiites from French Guiana // Nature. 1999. Vol. 399 (6735). P. 456-458. DOI: 10.1038/20911

14. *Canales D.G.* The Akwatia diamond field, Ghana, West Africa: source rocks: Unpubl. MSc thesis, New Mexico inst. Mining and Technilogy. Socorro, New Mexico, 2005. 143 p.

15. *Davis D.W., Hirdes W., Schaltegger U.* U-Pb age constraint on deposition and provenance of Birimian and gold-bearing Tarkwaian sediments in Ghana, West Africa // Precambrian Research. 1994. Vol. 67. Iss. 1-2. P. 89-107. DOI: 10.1016/0301-9268(94)90006-X

16. *Gueye M., Seigemund S., Wemmer K. et al.* New evidence for an early Birimian evolution in the West African Craton: an example form Kedougou-Kenieba inlier, southeast Senegal // South African Journal of Geology. 2007. Vol. 110. № 4. P. 534-551. DOI: 10.2113/gssajg.110.4.511

17. *Саблуков С.М., Каминский Ф.В., Саблукова Л.И.* Древние алмазоносные изверженные породы некимберлитового типа // Труды V Международного семинара «Проблемы источников глубинного магматизма и плюмы», 02-04 июня 2009, Санкт-Петербург, Россия. Иркутск – Петропавловск-Камчатский: Изд-во Института географии СО РАН, 2005. С. 116-134.

18. *Kaminsky F.V., Sablukov S.M., Sablukova L.I.* Diamondiferous Archaean lamprophyres with komatiitic affinities from the Wawa area, Ontario, Canada // 8th International Kimberlite Conference. Victoria, Canada, 2003. P. 123. DOI: 10.29173/ikc3248

19. *Устинов В.Н.* Прогнозно-поисковые типы проявления погребенных кимберлитовых полей в терригенных коллекторах алмазов // Записки Горного института. 2009. Vol. 183. С. 149-159.

20. *Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Мак-Дональд Дж.А. и др.* Кристаллические включения в алмазах из кимберлитов района Снэп-Лейк (кратон Слейв, Канада): новые свидетельства аномального строения литосферы // Доклады Академии наук. 2001. Т. 380. № 3. С. 374-379.

21. *Устинов В.Н., Антащук М.Г., Загайный А.К. и др.* Перспективы выявления месторождений алмазов на севере Восточно-Европейской платформы // Руды и металлы. 2018. № 1. С. 11-26.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

22. Петрографический кодекс. Магматические и метаморфические образования / Отв. ред. О.А.Богатиков. СПб: ВСЕГЕИ, 1995. 128 с.

23. *Mitchell R.H.* Compositional variation of micas in kimberlites, orangeites, lamproites and lamprophyres // 6th International Kimberlite Conference. Novosibirsk, Russia. 1995. P. 390-392.

24. *Mahotkin I.L.* Petrology of group 2 kimberlite – olivine lamproite (K2L) from the Kostomuksha area, Karelia, N.W. Russia // 7th International Kimberlite Conference. 1998. P. 529-531. DOI: 10.29173like2793

25. *Соболев Н.В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.

26. *Gurney J.J., Helmstaedt H., Moore R.O.* A review of the use and application of mantle mineral geochemistry in diamond exploration // Pure and Applied Chemistry. 1993. Vol. 65. № 12. P. 2423-2442. DOI: 10.1351/pac199365122423

27. *Илупин И.П.* Новые данные о типоморфизме хромдиопсида из кимберлитов // Природные ассоциации, особенности состава и свойства минералов-спутников алмаза / Тр. ЦНИГРИ. 1988. Вып. 229. С. 7-9.

28. *Moore A.E.* A model for the origin of ilmenite in kimberlite and diamond: implications for genesis of the discrete nodule (magacryst) suite // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1987. Vol. 95. P. 245-253. DOI: 10.1007/BF00381274

29. *Schulze D.J., Anderson P.F.N., Carter Hearn Jr.B., Hetman C.M.* Origin and significance ofilmenite magacrysts from kimberlite // International Geology Review. 1995. Vol. 37. Iss. 9. P. 780-812. DOI: 10.1080/00206819509465427

30. *Mitchell R.H.* Kimberlites: mineralogy, geochemistry, and petrology. New York: Plenum Press, 1986. 442 p.

31. *Smith C.B., Lucas H., Hall A.E., Ramsay R.R.* Diamond prospectivity and indicator mineral chemistry: a western Australian perspective // Fifth International Kimberlite Conference, Minas Gerais, Brazil, CPRM, 1991. Vol. 2/91. P. 380-382.

32. *Ramsay R.R., Tompkins L.* The geology, heavy mineral concentrate, mineralogy, and diamond propectivity of the Boa Esperanca and Cana Verde pipes, Corrego D'anta, Minas Gerais, Brazil // Fifth International Kimberlite Conference, Minas Gerais, Brazil. CPRM, 1991. Vol. 1B. P. 329-345.

33. *Ramsay R.R., Edwards D., Taylor W.R. et al.* Compositions of garnet and spinel from the Aries diamondiferous kimberlite pipe, Central Kimberley Block, Western Australia – implications for exploration // Journal of Geochemical Exploration. 1994. Vol. 51. Iss. 1. P. 59-78. DOI: 10.1016/0375-6742(94)90005-1

34. *Creighton S.* A semi-empirical manganese-in-garnet single crystal thermometer // Lithos. 2009. Vol. 112. Suppl. 1. P. 177-182. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.05.011

35. *Ryan C.G., Griffin W.L., Pearson N.J.* Garnet geotherms: pressure-temperature data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in volcanic rocks // Journal of Geophysical Research. 1996. Vol. 101. Iss. B3. P. 5611-5625. DOI: 10.1029/95JB03207

36. *Ashchepkov I.V., Pokhilenko N.P., Vladykin N.V. et al.* Reconstruction of mantle sections beneath Yakutian kimberlite pipes using monomineral thermobarometry // Metasomatism in Oceanic and Continental Lithospheric Mantle. London: Geological Society, 2008. Vol. 293. P. 335-352. DOI: 10.1144/SP293.15

37. *Brey G.P., Kolher T.* Geothermobarometry in Four-phase Lherzolites II. New Thermobarometers, and Practical Assessment of Existing Thermobarometers // Journal of Petrology. 1990. Vol. 3. Iss. 6. P. 1353-1378. DOI: 10.1093/petrology/31.6.1353

38. *Achterbergh E., Griffin W.L., Stiefenhofer J.* Metasomatism in mantle xenoliths from the Letlhakane kimberlites: estimation of element fluxes // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2001. Vol. 141. P. 397-414. DOI: 10.1007/s004100000236

39. *Ellis D.G., Green D.H.* An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinoperoxene Fe-Mg exchange equilibria // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1979. Vol. 71. P. 13-22. DOI: 10.1007/BF00371878

40. *Симаков С.К.* Физико-химические условия образования алмазоносных парагенезисов эклогитов в породах верхней мантии и земной коры. Магадан: Северо-Восточный научный центр ДВО РАН, 2003. 187 с.

41. *Харькив А.Д.* Минералогические основы поисков алмазных месторождений. М.: Недра, 1978. 136 с.

42. *Загайный А.К., Устинов В Н., Журавлев В.А.* Структурно-тектонические факторы размещения проявлений кимберлитового и лампроитового магматизма северо-запада Восточно-Европейской платформы // Геология алмаза – настоящее и будущее (геологи к 50-летнему юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. С. 79-86.

43. *Микоев И.И., Загайный А.К.* Особенности глубинного строения и структурно-тектонические предпосылки локализации алмазоносных магматитов Северо-Онегозерского кимберлитового района // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: Материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», 18-20 марта 2008, Мирный, Россия. Якутск: Изд-во Якутского научного центра Сибирского отделения РАН, 2008. С. 93-97.

44. *Fieremans M.R., Fieremans C.L.* Diamond in its primary rocks with special reference to the diamond deposits of Mbujimayi, East Kasai, Zaire // Bulletin Society Geology. 1992. Vol. 101. P. 9-39.

45. *Mainkar D., Lehmann B., Haggerty S.E.* The crater-facies kimberlite system of Tokapal, Bastar District, Chhattisgarh, India // Lithos. 2004. Vol. 76. Iss. 1-4. P. 201-217. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.04.024

46. *Berryman A.K., Scott Smith B.H., Jellicoe B.C.* Geology and diamond distribution of the 140/141 kimberlite, Fort à la Corne, central Saskatchewan, Canada // Lithos. 2004. Vol. 76. P. 99-114. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.04.031

47. *Подчасов В.М., Минорин В.Е., Богатых И.Я. и др.* Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов. Книга 1: Коренные месторождения. Якутск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2004. 548 с.

48. *Микоев И.И.* Наземные геофизические исследования при поисках кимберлитовых тел: результаты и эффективность в различных поисковых обстановках // Руды и металлы. 2018. № 3. С. 40-46. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-10005

49. *Lehtonen M., Marmo J.* Glacial dispersion study of kimberlitic material in Quaternary till from the Lahtojoki pipe, eastern Finland // 8th International Kimberlite Conference: Long Abstract. 2003. P. 1-5. DOI: 10.29173/ikc2989

50. *Tyni M.* Diamond prospecting in Finland // A review. Geological Survey of Finland. 1997. P. 789-791.

51. *Ustinov V., O'Brien H., Lukianova L., Peltonen P.* Diamond-bearing kimberlites of northern Europe // 9th International Kimberlite Conference, Frankfurt, Germany, 2008. № IKC-A-00112. DOI: 10.29173/ikc3357

52. Sunrise Resources Plc. Relinquishment Report: Lapinluhta 1. URL: https://tupa.gtk.fi/raportti/valtaus/7606_1.pdf (дата обращения 20.02.2021).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

53. Reed L.E., Witherly K.E. 50 Years of Kimberlite Geophysics, A Review // Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploratio. 9-10 September 2007, Toronto, Canada. Exploration, 2007. P. 679-689.

54. *Ларченко В.А., Степанов В.П., Минченко Г.В., Первов В.А.* Возраст магматических пород, рудовмещающей толщи и среднепалеозойских коллекторов Зимнебережного алмазоносного района (Архангельская алмазоносная провинция) // Геология алмаза – настоящее и будущее (геологи к 50-летнему юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. С. 322-347.

55. *Пенделяк Р.Н., Морозов А.В., Могутова В.А.* Геологическое строение трубки им. В.П.Гриба и ее индикаторные особенности в геофизических полях // Отечественная геология. 2019. № 5. С. 53-59. DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10038

56. *Мещеряков М.Г., Головин Н.Н., Веричев Е.М.* Открытие, оценка и разведка месторождения алмазов им. В.Гриба // Горный журнал. 2014. № 3. С. 22-26.

57. *Стогний В.В., Коротков Ю.В.* Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Малотиражная типография 2D, 2010. 121 с.

58. Applied Electromagnetic Research (AEMR). URL: http://www.aemr.net (дата обращения 12.02.2021).

59. *Абрамов В.Ю.* Петрофизические характеристики геолого-геофизических моделей кимберлитовых тел Архангельской алмазоносной провинции // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 1. С. 70-76.

60. *Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н.* Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. М.: Недра, 2002. 695 с.

61. *Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: Правда Севера, 2004. 283 с.

62. *Вержак В.В.* Геологическое строение, вещественный состав, условия образования и методика разведки месторождения алмазов им. М.В.Ломоносова: Автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. М.: Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, 2001. 27 с.

***Авторы*: В.Н.Устинов,** *д-р геол.-минерал. наук, советник генерального директора, ustinovvn@agddiamond.com, https://orcid.org/0000-0002-6565-6575* (*АО «АГД Даймондс», Санкт-Петербург, Россия*), **И.И.Микоев,** *канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0001-8866-2938* (*Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Санкт-Петербург, Россия*), **Г.Ф.Пивень,** *д-р техн. наук, генеральный директор, https://orcid.org/0000-0003-2824-5627* (*АО «АГД Даймондс», Архангельск, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0