

Оригинальная статья

Новые перспективы Алакит-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма

Е. В. Поспеева¹, А. В. Толстов^{✉,2}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация*

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

[✉]*tols61@mail.ru*

Аннотация

Восполнение минерально-сырьевой базы в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе (ДААР) Якутии связывается с выявлением новых коренных месторождений алмазов в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля (АМКП). Территория развития палеозойских терригенно-карбонатных отложений в пределах поля осложнена интродуцированными телами (дайки, силлы, покровы) траппов, создающих весьма трудную геологическую задачу для поисков. Цель данного исследования – изучение особенностей глубинного строения земной коры (включая осадочный) чехол и их связи с проявлениями кимберлитового магматизма для выделения на территории с весьма сложным геологическим строением объектов кимберлитового магматизма геофизическими методами с учетом современных возможностей обработки и интерпретации первичных материалов. Результаты прогнозно-поисковых исследований с помощью магнитотеллурических зондирований (МТЗ), проведенных в пределах юго-западного фланга АМКП, рассмотрены с позиций структурного контроля размещения полей кимберлитов и их кустов. Показано, что основные факторы, контролирующие проявления кимберлитового магматизма на стадии среднемасштабных и локальных исследований: проводящие неоднородности в земной коре, расположенные в узлах пересечения Далдыно-Оленекской зоны глубинных разломов с разнонаправленными тектоническими нарушениями (малоамплитудными депрессиями), осложненными структурами противоположного знака. Подобные геолого-структурные предпосылки установлены на участках развития кимберлитовых тел, выявленных геологическими исследованиями в пределах АМКП. Усиленные благоприятными минералого-геохимическими результатами, эти предпосылки могут рассматриваться в качестве основных критериев прогнозирования новых кимберлитовых тел в хорошо изученном районе. По совокупности геолого-геофизических, минералогических и геохимических данных выделена центральная часть изученного профиля МТЗ, наиболее перспективная для прогнозирования и выявления новых алмазоносных объектов разряда отдельных кимберлитовых тел.

Ключевые слова: магнитотеллурические исследования, Далдыно-Алакитский алмазоносный район, Алакит-Мархинское кимберлитовое поле, проводящие неоднородности, тектонические нарушения, кимберлитовый магматизм

Финансирование. Статья подготовлена в рамках государственного задания ИНГГ и ИГАБМ СО РАН.

Для цитирования: Поспеева Е.В., Толстов А.В. Новые перспективы Алакит-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):20–37. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-20-37>

Prospects of the southwestern part of the Alakit-Markha kimberlite field for the manifestation of kimberlite magmatism: magnetotelluric studies

Elena V. Pospeeva¹, Alexander V. Tolstov^{✉,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉tols61@mail.ru

Abstract

The replenishment of the mineral resource base in the Daldyn-Alakit diamond-bearing region (Yakutia) is associated with the identification of new primary diamond deposits within the Alakit-Markha kimberlite field (AMKF). The development of Paleozoic terrigenous carbonate deposits within the field is complicated by intruded bodies of traps, thus creating a challenging geological task for prospecting. This study aimed to investigate the features of the deep structure of the Earth's crust, including sedimentary cover, and their relationship with the manifestations of kimberlite magmatism to isolate objects of kimberlite magmatism by geophysical methods in an area with a very complex geological structure. The results of predictive prospecting studies using magnetotelluric sounding (MTS) conducted within the southwestern flank of the AMKF are considered from the standpoint of structural control of the placement of kimberlite fields and their bushes. Our findings show that the main factors controlling the manifestations of kimberlite magmatism at the medium-scale stage, and local studies include conducting inhomogeneities in the Earth's crust located at the intersection points of the Daldyn-Olenek zone of deep faults with multidirectional tectonic disturbances and low-amplitude depressions complicated by structures of the opposite sign. Similar geological and structural prerequisites were established in the areas of development of kimberlite bodies identified by geological studies within the AMKF. Enhanced by favorable mineralogical and geochemical results, these prerequisites can be considered the main criteria for predicting new kimberlite bodies in a well-studied area. We specified the central part of the studied MTS profile based on the geological, geophysical, mineralogical, and geochemical data, which is the most promising for forecasting and identifying new diamond-bearing objects in the category of individual kimberlite bodies.

Keywords: magnetotelluric surveys, Daldyn-Alakit diamond-bearing area, Alakit-Markha kimberlite field, conducting inhomogeneities, tectonic disturbances, kimberlite magmatism

Funding. This article was prepared within the framework of the state assignment for the IPGG SB RAS and DPMGI SB RAS.

For citation: Pospeeva E.V., Tolstov A.V. Prospects of the southwestern part of the Alakit-Markha kimberlite field for the manifestation of kimberlite magmatism: magnetotelluric studies. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):20–37. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-20-37>

Введение

Далдыно-Алакитский алмазоносный район является одним из главных регионов интенсивной алмазодобычи в Республике Саха (Якутия), поскольку здесь сосредоточена значительная доля запасов алмазов Сибирской платформы (рис. 1). Восполнение минерально-сырьевой базы для действующих в данном регионе горно-обогачительных комбинатов – актуальная задача. Прирост запасов алмазов в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе (ДААР) сегодня связывается только с обнаружением новых коренных месторождений алмазов в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля (АМКП), где широко развиты палеозойские карбонатно-терригенные

отложения, интродуцированные пластовыми телами долеритов, создающие весьма сложную геологическую задачу для поисков. Прямым признаком высокого потенциала АМКП на обнаружение новых высокоалмазоносных кимберлитов являются находки алмазов и минералов-индикаторов кимберлита (ИМК) хорошей сохранности в перекрывающих верхнепалеозойских песчано-галечных отложениях. Наименее изучены юго-западный и западный фланги поля, которые являются переходной зоной к территории Моркокинского кимберлитового поля с единственной трубкой Моркока. Эта территория перспективна на обнаружение кимберлитовых тел, поскольку расположена в пределах Далдыно-Оленекской

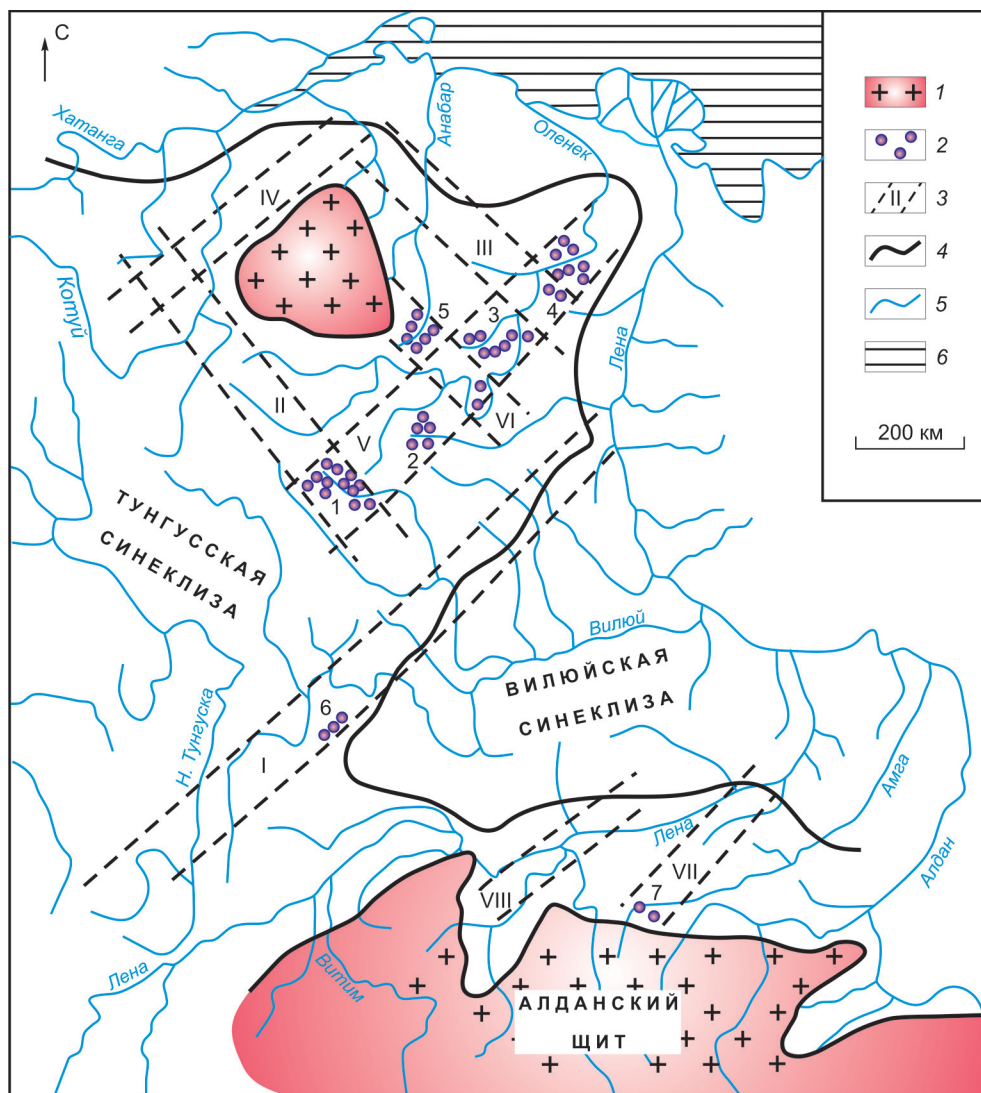


Рис. 1. Схема расположения дизъюнктивных структур восточной части Сибирской платформы [2]:

1 – выходы на поверхность кристаллического фундамента платформы; 2 – кимберлитовые трубки и дайки (1 – Алачит-Далдынская группа, 2 – Мунская группа, 3 – Средне-Оленекская группа, 4 – Куойско-Мэрчимденская группа, 5 – Анабарская группа; 6 – группа трубки «Мир», 7 – Алданская группа); 3 – дизъюнктивные зоны разломов (I – Ангара-Мунская, II – Мархинско-Котуйская, III – Молодо-Попигайская, IV – Котуйско-Анабарская, V – Мархинско-Оленекская, VI – Мунско-Анабарская, VII – Чугино-Ленская, VIII – Чарская); 4 – границы крупных платформенных структур; 5 – гидросеть; 6 – территория, занятая морем

Fig. 1. Layout of disjunctive structures of the eastern part of the Siberian platform [2]:

1 – outcrops to the surface of the crystalline basement of the platform; 2 – kimberlite pipes and dikes: 1 – Alakite-Daldyn group, 2 – Munsky group, 3 – Sredne-Olenek group, 4 – Kuoyisko-Merchimden group, 5 – Anabar group; 6 – Mir tube group, 7 – Aldan group; 3 – disjunctive fault zones: I – Angara-Munskaya, II – Markhinsko-Kotuyskaya, III – Molodo-Popigayskaya, IV – Kotuysko-Anabarskaya, V – Markhinsko-Olenekskaya, VI – Munsko-Anabarskaya, VII – Chugino-Lena, VIII – Charskaya; 4 – borders of large platform structures; 5 – hydro grid; 6 – territory occupied by the sea

кимберлитоконтролирующей зоны глубинных разломов, к которой тяготеет целый ряд кимберлитовых полей (см. рис. 1), а в верхнепалеозойских отложениях обнаружены находки алмазов и ореолы рассеяния ИМК неустановленного коренного источника [9]. Однако прогнозирование и поиски

здесь новых месторождений алмазов осложняются широким развитием в геологическом разрезе пластовых и даечных тел базитовых туфов и долеритов, что затрудняет применение на стадии локального прогноза традиционных геофизических методов – магнито-, грави- и электроразведки.

Возможность выделения объектов кимберлитового магматизма геофизическими методами определяется отличием их физических свойств от вмещающих пород. Опыт работ в Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) показал, что подавляющее большинство кимберлитовых тел ввиду их невысокой магнитности не отражаются в магнитном поле, а аномалии «трубчатого типа» зачастую имеют базитовую природу. Помимо этого, в сложном магнитном поле, обусловленном траппами и площадным распространением обогащенных магнитными минералами терригенно-карбонатных пород, выделение перспективных аномалий крайне затруднено, а порой и практически невозможно. В то же время, результаты изучения удельного электрического сопротивления Якутской и Архангельской кимберлитовых провинций показали, что сопротивление кимберлитов значительно изменяется от одной кимберлитовой трубки к другой, но в большинстве случаев обнаруживается идентичность их электрических свойств и характеристик по отношению к вмещающим толщам [10].

В связи с этим возникает необходимость поиска дополнительных геофизических критериев прогнозирования на базе выделения факторов структурно-тектонического контроля кимберлитового магматизма. Одним из технологических методов, позволяющих интерпретировать структурно-тектонические особенности и изучать глубинное строение земной коры алмазоносных территорий, является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Результаты применения региональных и среднемасштабных исследований методом МТЗ на Сибирской платформе показали его высокую информативность при прогнозировании разноранговых объектов кимберлитового магматизма. Установлено, что в пределах ЯАП наряду с ореолами ИМК, гравимагнитными минимумами и повышенной сейсмической гетерогенностью земной коры критерием прогнозирования кимберлитовых полей служит наличие проводящих субвертикальных неоднородностей на фоне высокоомного разреза земной коры. Кимберлитовые районы, как правило, располагаются в пределах крупных неоднородностей высокого сопротивления, а поля и кусты кимберлитовых трубок локализуются в пределах проводящих субвертикальных неоднородностей, связанных с системами региональных глубинных разломов, обуславливающих формирование структур рифтогенного растяжения.

Наличие проницаемых зон под кимберлитовыми полями не является их уникальной особенностью. Эндогенные рудогенерирующие системы построены по единой схеме, включающей три уровня: зону генерации (или глубинный источник мобильной фазы – магм или флюидов с растворенными в них рудными компонентами), транспортную зону (дренажную сеть, выводящую мобильную фазу в верхние горизонты земной коры) и зону консолидации, где мобильная фаза кристаллизуется – в случае магматических расплавов или сбрасывает рудную нагрузку или рассеивается – в случае флюидных потоков. Исходя из этого, можно предположить, что проводящие зоны могут представлять собой транспортную зону магматических расплавов в верхние горизонты земной коры и связаны с верхним уровнем эндогенной рудообразующей системы.

Многочисленные данные о глубинном строении рудных районов свидетельствуют об их очаговой природе, причем в большинстве случаев под ними устанавливаются очаги разуплотнения (в верхней мантии и земной коре), а также пологие зоны волноводов. Все это позволяет рассматривать рудные, в том числе и кимберлитовые, районы как многоочаговые постройки, отличающиеся повышенной проницаемостью. Существования отдельных проницаемых зон для объяснения пространственного размещения кимберлитового магматизма недостаточно. Необходимым условием для обеспечения «сквозной» мантийно-коровой проницаемости являются области пересечения или совмещения проницаемых зон. В этом случае возникает субвертикальная проницаемая область, обеспечивающая корово-мантийное взаимодействие и формирование благоприятных условий для размещения кимберлитовых районов и полей [16]. В этом плане особый интерес представляют проводящие неоднородности, расположенные в узлах пересечения Далдыно-Оленекской и Вилюйско-Котуйской зон глубинных разломов. Интересно отметить, что Сюльдюкарское кимберлитовое поле, открытое сравнительно недавно (2015 г.) в западной части Вилюйско-Мархинской кимберлитоконтролирующей зоны глубинных разломов [17], пространственно сопряжено с проводящей неоднородностью, выделенной нами по данным региональных МТЗ еще в конце 80-х годов прошлого столетия [22, 23] и рекомендованной для проведения алмазопроисловых работ (рис. 2).

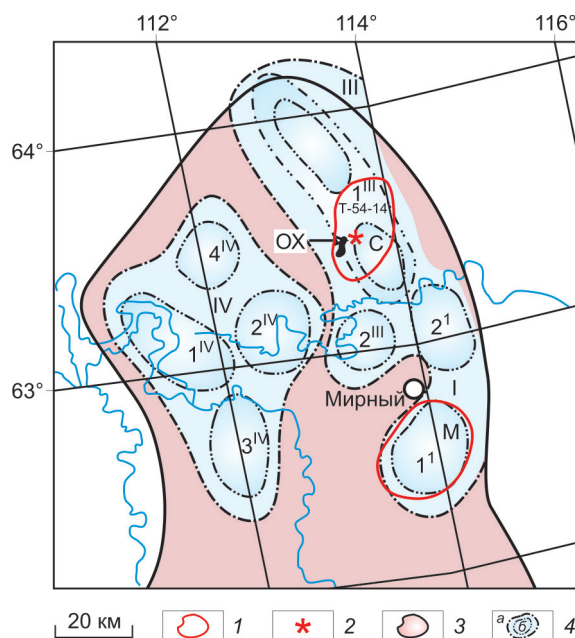


Рис. 2. Фрагмент Карты результатов региональных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазонасной провинции:

1 – контуры кимберлитовых полей (М – Мирнинское, С – Сюльдюкарское); 2 – новое кимберлитовое тело (аномалия Т-54-14); 3 – контуры высокоомной неоднородности; 4 – контуры проводящих неоднородностей первого (а) и второго (б) порядков (I – Ботубинская, III – Бахчинская, IV – Вилуйская, 1^I – Мирнинская, 2^I – Сюльдюкарская восточная, 1^{III} – Холмологинская, 2^{III} – Сюльдюкарская западная, 2^{IV} – Анняхская, 3^{IV} – Чернышевская, 4^{IV} – Ахтарандинская)

Fig. 2. Fragment of the Map of the results of regional magnetotelluric studies in the Yakut diamond-bearing province:

1 – contours of kimberlite fields: M – Mirninskoye, C – Syuldyukarskoye; 2 – a new kimberlite body (anomaly T-54-14); 3 – contours of high-resistance inhomogeneity; 4 – contours of conducting inhomogeneities of the first (a) and second (b) orders: I – Botubinskaya, III – Bakhchinskaya, IV – Vilyuiskaya, 1^I – Mirninskaya, 2^I – Syuldyukarskaya East, 1^{III} – Holomolokhinskaya, 2^{III} – Syuldyukarskaya West, 2^{IV} – Annyakhskaya, 3^{IV} – Chernyshevskaya, 4^{IV} – Akhtarandinskaya

Таким образом, к факторам, контролирующим проявления кимберлитового магматизма в ЯАП, можно отнести глубинные системы рифтогенных разломов, области их пересечения в пределах блоков земной коры с высокими значениями удельного электрического сопротивления и проводящие проницаемые зоны, расположенные в узлах пересечения разнонаправленных глубинных разломов. Поэтому целевым назначением настоящих исследований было изучение особенностей глубинного строения земной коры (включая осадочный) чехол и их связи с проявлениями кимберлитового магматизма, что предусматривало решение следующих задач:

- построение геоэлектрической модели осадочного чехла, определение латеральных размеров и мощности долеритовых пластовых интрузий;
- прослеживание разрывных нарушений в осадочном чехле на основе анализа данных электроразведки;
- выявление основных особенностей глубинного строения консолидированной части земной коры.

Краткий очерк геологического строения Далдыно-Алаakitского алмазонасного района (ДААР)

ДААР расположен в центральной части ЯАП в пределах северо-восточной окраины Тунгусской синеклизы на ее стыке с Анабарской антеклизой и включает в себя два кимберлитовых поля: Алаakit-Мархинское и Далдынское (см. рис. 1). В пределах зоны сочленения выделяются два структурных этажа Сибирской платформы, различающихся по строению и времени формирования: кристаллический фундамент и перекрывающий его платформенный осадочный чехол. Глубина залегания фундамента в ДААР составляет 2500 м на северо-востоке и 3100 м в его западной части [26, 28].

Слагающие фундамент породы входят в анабарский гранулитовый комплекс, относящийся к далдынской, верхнеанабарской и хапчанской сериям архея. В зонах слияния и дробления широко распространены полиметаморфические породы верхнелапукского комплекса, сформировавшиеся в результате диафореза в условиях амфиболитовой фации в позднеархейское-раннепротерозойское время.

В геологическом строении осадочного чехла принимают участие палеозойские образования, относящиеся к двум циклам седиментации, вулканогенно-осадочные породы пермо-триаса, а также четвертичные отложения различных генетических типов. В северо-восточной части района, в бассейне р. Далдын преобладают карбонатные породы нижнего ордовика и верхнего кембрия: известняки, доломиты, аргиллиты и мергели.

На юго-западе, в бассейне верховьев рек Алаakit и Марха развиты пестроцветные глинисто-карбонатные отложения среднего ордовика и известняки нижнего силура. Помимо этого, здесь широко распространены верхнепалеозойские отложения среднего и верхнего отделов каменно-

угольной, а также нижнего и верхнего отделов пермской систем: глинистые сланцы, алевролиты и песчаники.

Современный рельеф поверхности фундамента сформирован блоковой тектоникой платформенного этапа развития. Наиболее древними являются глубинные разломы субмеридиональной ориентировки – межблоковые и внутриблоковые. Первые разделяют крупные структурные блоки фундамента (антиклинорные и синклинорные) и часто сопровождаются динамометаморфическими преобразованиями. Внутриблоковые разломы имеют локальное развитие и контролируют образование локальных структур – горстов и грабенов. Характер внутриблоковых нарушений преимущественно сбросовый с амплитудами, не превышающими 100 м. Разломы меридиональной ориентировки активизировались в конце раннего протерозоя.

Вилуйско-Котуйская зона глубинных разломов северо-западного направления контролировала проявления траппового магматизма позднего палеозоя–раннего мезозоя. С разломами этого этапа связаны трапповые интрузии долеритов.

Проявления кимберлитового магматизма в Далдыно-Алакитском районе многие исследователи связывают с Далдыно-Оленекской зоной глубинных разломов северо-восточного простирания. По результатам геофизических исследований в нижнем структурном ярусе осадочного чехла выявлены разрывные нарушения девон-карбоновой активизации: Северо-Восточный, Алакитский, Байтахский и другие разломы (рис. 3). Предполагается, что все эти нарушения имеют унаследованный характер, являются отражением позднепротерозойских разломов и имеют сбросовый характер с амплитудой смещения 20–50 м. В карбонатной толще нижнего структурного яруса разломы представляют собой зоны повышенной трещиноватости и дробления, имеют сложное строение и проявлены в нескольких сейсмических горизонтах.

В южной и западной частях района широко распространены породы траппового комплекса, сложенные пластовыми интрузиями и дайками. Кимберлитовые тела располагаются в виде прерывистой северо-восточной полосы протяженностью 150 км. Они концентрируются в пределах двух полей: на северо-востоке располагается Далдынское поле, а в центральной и юго-западной частях – Алакит-Мархинское. Пространственное распределение трубок в полях подчиняется ли-

нейно-кустовой группировке. Северо-восточный тектонический контроль (принадлежность к Далдыно-Оленекской минерагенической зоне) показан на рис. 4 [15].

Алакит-Мархинское кимберлитовое поле (АМКП). Согласно существующим представлениям, АМКП расположено на пересечении Вилуйско-Котуйской зоны глубинных разломов северо-западного простирания и Далдыно-Оленекской зоны северо-восточного простирания. Анализ положения разрывных нарушений, выявленных в пределах Алакит-Мархинского поля, показал, что здесь в разной степени проявлены разнонаправленные системы нарушений [2, 6, 12]. Четко выражена система дизъюнктивных нарушений северо-восточной ориентировки. Именно эти тектонические нарушения Далдыно-Оленекской системы глубинных разломов контролируют пространственное размещение большинства кимберлитовых тел АМКП. При этом значительная их часть приурочена к узлам пересечения разнонаправленных тектонических нарушений – к участкам с наибольшей проницаемостью земной коры. Кимберлитовые тела АМКП находятся в пределах Сохсолохского грабенообразного прогиба, амплитуда которого достигает 250 м. Ось грабена ориентирована ортогонально простиранию главных региональных структур фундамента [11, 12].

Внутреннее строение Сохсолохского прогиба отличается от строения прилегающих структурных блоков широким развитием пликативных и дизъюнктивных дислокаций северо-восточного простирания. Большая часть кимберлитовых тел приурочена к северо-восточному воздыманию прогиба, располагаясь на склонах сложнопостроенных локальных депрессий – Айхальской, Байтахской, Центральной и Алакитской. Помимо главных направлений тектонических нарушений – северо-восточного и северо-западного простирания, выделяются субширотные и субмеридиональные, формирование которых связывается с Безымянным глубинным разломом, ограничивающим с севера Сохсолохский грабенообразный прогиб (см. рис. 3).

Методика исследований

Изученный профиль располагается в пределах юго-западного окончания АМКП (рис. 5). В качестве основного метода исследований применялся метод МТЗ, обработка результатов выполнена с использованием технологий V5 System – 2000 аппаратурой «MTU-5A» компании «Phoenix

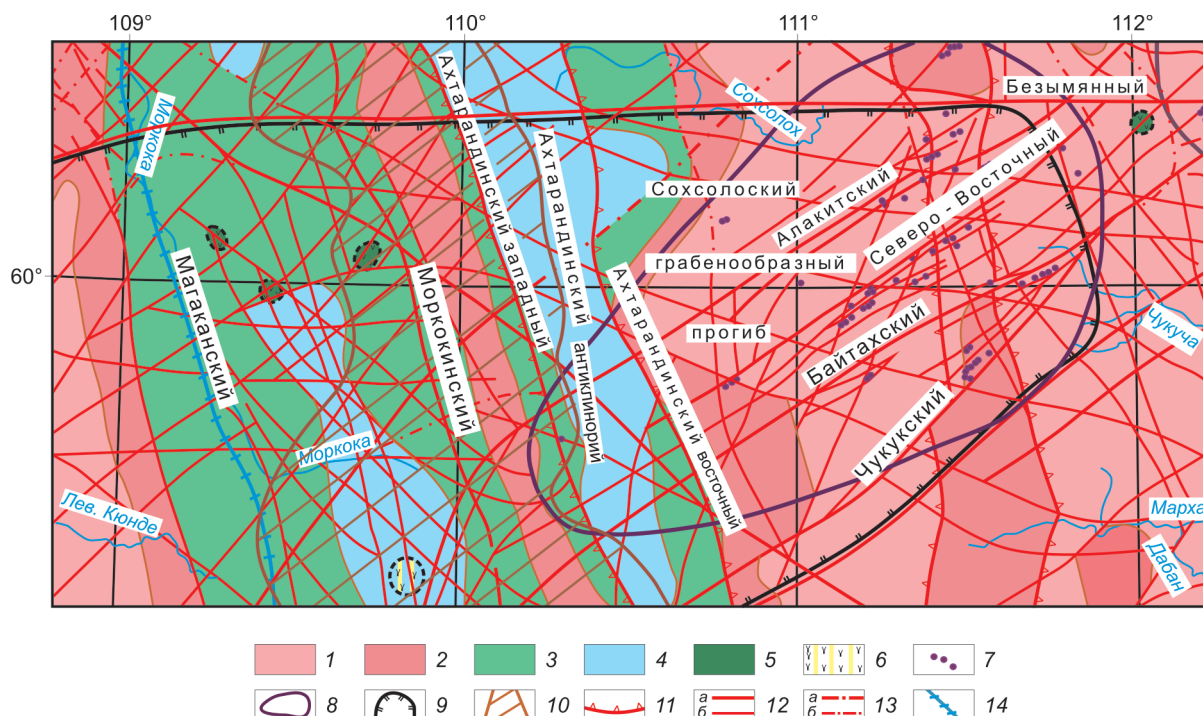


Рис. 3. Структурно-тектоническая схема Алакит-Мархинского кимберлитового поля, масштаб 1: 400 000:

Структурно-вещественные комплексы фундамента (Анабарский мегаблок, AR): 1 – преимущественно слабомагнитные и немагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов хапчанского комплекса), 2 – средне- и слабомагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов верхнеанабарского и хапчанского комплексов); 3 – средне- и высокомагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов верхнеанабарского комплекса); 4 – высокомагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов далдынского и верхнеанабарского комплексов); 5 – интрузивные массивы основного состава; 6 – массивы центрального типа щелочно-ультраосновного и карбонатитового составов, предполагаемые по комплексу геолого-геофизических данных; 7 – кимберлиты; 8 – Алакит-Мархинское кимберлитовое поле; 9 – рифтоподобные и рифтогенные структуры (грабены, грабенообразные прогибы); 10 – зоны тектонотермальной переработки пород архейского фундамента, заложенные в раннем протерозое; 11 – складчатые разломы фундамента, контролируемые крупными антиклинориями и синклинориями Анабарского мегаблока; 12 – секущие разломы, проявленные в фундаменте и в нижних горизонтах осадочного чехла (*a* – региональные, *b* – второстепенные); 13 – секущие разломы, трассируемые дайками долеритов (*a* – региональные, *b* – второстепенные); 14 – пограничные разломы складчато-блоковых структур первого порядка в пределах Анабарского мегаблока

Fig. 3. Structural and tectonic scheme of the Alakit-Markha kimberlite field (1:400 000 scale):

Structural and material complexes of the foundation (Anabar megablock, AR): 1 – mainly weakly magnetic and non-magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Hapchan complex), 2 – medium and weakly magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Upper Anabar and Hapchan complexes); 3 – medium and high magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Upper Anabar complex); 4 – high-magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Daldyn and Upper Anabar complexes); 5 – intrusive massifs of the main composition; 6 – massifs of the central type of alkaline-ultrabasic and carbonatite compositions, assumed from a complex of geological and geophysical data; 7 – kimberlites; 8 – Alakite-Markhinsky kimberlite field; 9 – rift-like and riftogenic structures (Grabens, graben-like deflections); 10 – zones of tectonic-thermal processing of rocks of the Archean basement, laid in the early Proterozoic; 11 – interlaced basement faults controlling large anticlinoria's and synclinories of the Anabar megablock; 12 – secant faults manifested in the foundation and in the lower horizons of the sedimentary cover (a – regional, δ – secondary); 13 – secant faults traced by dolerite dikes (a – regional, δ – secondary); 14 – boundary faults folding-block structures of the first order within the Anabar megablock

Geophysics». Регистрация четырех компонент магнитотеллурического поля (E_x , E_y , H_x , H_y) осуществлялась с шагом 1 км в течение 14–17 часов с применением крестообразной установки с длиной приемных линий 100 м, ориентированных по шкале магнитологов с ориентацией оси X на севере, а Y на восток. Плановая и высотная при-

вязка пунктов зондирования проводилась с помощью системы GPS.

Обработка и интерпретация исходных данных состояла из следующих этапов:

1. Обработка четырехкомпонентных записей магнитотеллурического поля в программе SSMT-2000, реализующей современные алгоритмы спек-

трального анализа в режимах одиночных («local», SS) и при необходимости синхронных зондирований с удаленной базой («remote reference», RR).

2. Приведение симметричного тензора к его главным осям. При вращении тензора импеданса можно получить множество амплитудных и фазовых кривых ρ_{xy} , ρ_{yx} и ϕ_{xy} , ϕ_{yx} [3], конфигурация которых существенно зависит от их ориентации, и они могут противоречить друг другу. Поэтому после первичной обработки полевых данных на каждом пункте зондирования проводился анализ амплитудных и фазовых полярных диаграмм тензора импеданса и определялся угол α , характеризующий его главные направления. После этого вновь проводилась обработка данных с поворотом системы координат на этот угол.

3. Анализ магнитотеллурических параметров, выполненный на основе упрощенного теста М.Н. Бердичевского [3]. Анализируемые параметры – N_{mt} – параметр неоднородности [3], $Skew_S$ – параметр асимметрии [31], $Skew_B$ – фазочувствительный параметр асимметрии [29] оценивались по отношению к пороговым значениям δ , лежащим в интервале $0,05 \div 0,15$. Анализ показал, что на высоких частотах ($\sqrt{T} < 2 \text{ с}^{1/2}$) в северо-западной и юго-восточной частях профиля параметр лежит в пределах пороговых значений. В диапазоне $\sqrt{T} = 0,2 \div 10 \text{ с}^{1/2}$ они возрастают до 0,3, а на самых низких периодах ($\sqrt{T} > 10 \text{ с}^{1/2}$) до 0,5. Центральная часть профиля характеризуется сложным распределением значений параметра как по вертикали, так и по латерали. Здесь на высоких периодах ($\sqrt{T} < 1 \text{ с}^{1/2}$) отмечается чередование областей с пороговыми значениями и областей со значениями, близкими к ним (0,2), а с понижением частоты значения параметра N_{mt} постепенно увеличиваются до 0,6.

Аналогичная ситуация отмечается и на частотных разрезах параметров $Skew_S$ и $Skew_B$. В северо-западной и юго-восточной частях профиля они лежат в пределах пороговых значений на периодах $\sqrt{T} = 0,05 \div 5 \text{ с}^{1/2}$, постепенно возрастая с понижением частоты до 0,4–0,5. Повышенным значениям $Skew_S$ отвечают повышенные значения $Skew_B$. Таким образом, согласно Бару [29], глубинный региональный фон можно рассматривать как двухмерную среду. Об этом свидетельствует и форма полярных диаграмм тензора импеданса.

4. Инверсия магнитотеллурических данных. Особенность количественной интерпретации кривых МТЗ, полученных на изученном профиле,

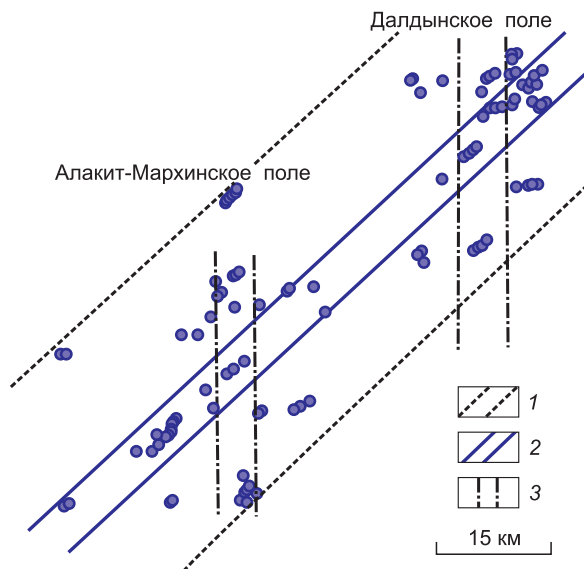


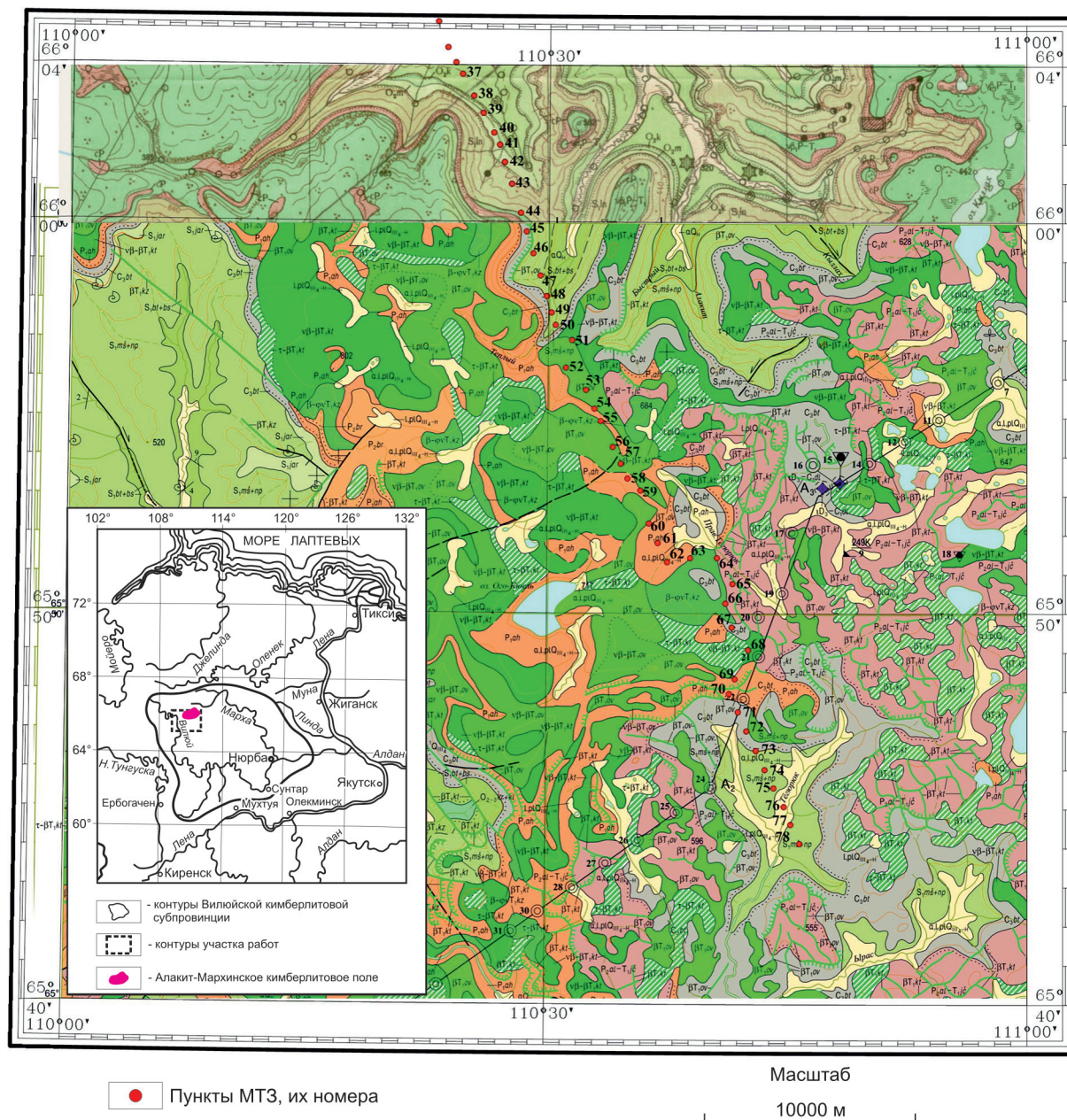
Рис. 4. Схема расположения трубок Далдынского и Алакит-Мархинского полей [15]:
1 – контуры зоны, вмещающей все трубки; 2 – центральная зона шириной 6 км; 3 – предполагаемые субмеридиональные зоны

Fig. 4. Layout of the pipes in the Daldyn and Alakit-Markha fields [15]:

1 – the contours of the zone containing all the tubes; 2 – the central zone with a width of 6 km; 3 – the proposed submeridional zones

обусловлена сложным геологическим строением Далдино-Алакитского алмазоносного района. Здесь в разрезе земной коры (включая осадочный чехол) существует несколько типов геоэлектрических структур, оказывающих влияние на кривые МТЗ. В зависимости от поляризации магнитотеллурического поля (МТ-поля) проявляются два типа искажающих эффектов – индукционные и гальванические [3]. Первые вызваны избыточными токами, индуцированными в телах с высокой электропроводностью. Вторые связаны с обтеканием электрическим током высокоомных объектов и его концентрацией в проводящих объектах. В изученном районе проявляются оба типа искажающих эффектов.

Многолетнемерзлые породы, включающие силлы траппов, часто выходящие на дневную поверхность, формируют в МТ-поле гальванические искажения – так называемый «р-эффект», который приводит к статическому сдвигу («static shift») поперечных кривых по оси сопротивления вверх. При этом продольные кривые остаются близкими к локально-нормальной. Кроме объектов, формирующих гальванические эффекты, в осадочном чехле Алакит-Мархинского поля вы-



деляется мощная проводящая неоднородность ($S > 500 \text{ См}$), прослеживающаяся на расстояние более 100 км [18], оказывающая индукционное влияние на продольные кривые МТЗ. По данным глубинных сейсмических зондирований [26], здесь отмечается аномалия пониженных скоростей до значений 6,2 км/с. Аномальная область приурочена к породам средне- и нижнекембрийских водоносных комплексов с минерализацией, достигающей значений 403 г/см^3 [1].

Эффект статического смещения исключался с помощью процедуры «нормализации» путем смещения кривых МТЗ к уровню кривых ЗСБ. Анализировалась каждая пара кривых, зарегистрированных в едином пункте зондирования (рис. 6). Различия в способе нормирования электромагнитных сигналов и характере распространения поля приводят к разнице глубинности и разрешающей способности методов МТЗ и ЗСБ, а также к различному поведению кривых.

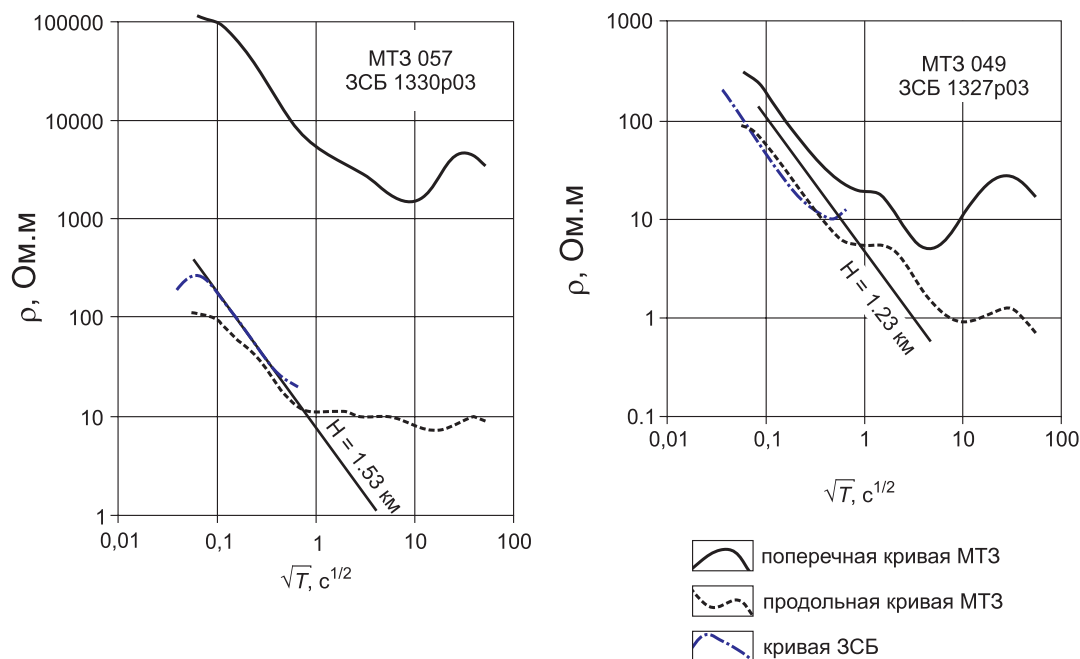


Рис. 6. Пример совмещения кривых МТЗ и ЗСБ в едином пункте зондирования

Fig. 6. Example of combining MTZ and ZSB curves in a single sensing point

Для кривых МТЗ восходящие и нисходящие асимптотические ветви симметричны относительно оси ρ , а кривые ЗСБ имеют разный наклон асимптот при $\rho_2 \rightarrow \infty$ и $\rho_2 \rightarrow 0$ [21]. Это обстоятельство приводит к тому, что при простом совмещении кривых ρ_k в системе $\rho = f(t)$ наблюдается значительное расхождение экстремумов, восходящих и нисходящих ветвей кривых МТЗ и ЗСБ. Для представления кривых МТЗ и ЗСБ в графическом виде в качестве абсцисс лучше всего использовать $\sqrt{T}$ и $\sqrt{2\pi t}$, где T и t – период гармонического поля и время наблюдения. При этом квадратный корень показывает, что изменение эффективной глубины зондирования пропорционально изменению абсцисс кривых [5].

В настоящее время существует несколько способов совмещения кривых МТЗ и ЗСБ. В данном случае совмещение проводилось нами по уровню ρ_k и параметрам S (интегральная проводимость надпорной толщи) и H (глубина залегания надпорной толщи) по методике, детально рассмотренной в литературе [19] (см. рис. 6). После проведения нормализации осуществлялась количественная интерактивная 1D и 2D инверсия.

Обсуждение результатов

По особенностям распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) геоэлектрический разрез изученного профиля разде-

ляется на три части: северо-западную (блок I, п.п. 39–56), центральную (блок II, п.п. 56–72) и юго-восточную (блок III, п.п. 72–87) (рис. 7–9), ограниченные разломами.

В структуре осадочного чехла первый и третий блоки представляют собой валообразные поднятия, а центральный – грабенообразный прогиб. Протяженность поднятий и прогиба составляет 17, 16 и 15 км соответственно.

Платформенный чехол, сложенный терригенно-карбонатными и сульфатно-галогенно-карбонатными породами венда–нижнего палеозоя и несогласно перекрывающими их вулканогенно-терригенными образованиями верхнего палеозоя–нижнего мезозоя, подразделяются на шесть геоэлектрических горизонтов:

$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 > \rho_5 < \rho_6$ (см. рис.7).

Первый (I) геоэлектрический горизонт развит, преимущественно, в центральной части профиля (блок II) и выклинивается в северо-западном (блок I) и юго-восточном (блок III) направлениях. Горизонт приурочен к пермским отложениям алаkitской (P_{2al}), боруллойской (P_{2br}), ахтарандинской (P_{2ah}) свит и ботубинской (C_{3br}) свиты верхнего отдела каменноугольной системы. Породы представлены песчаниками, алевролитами, углисто-глинистыми сланцами, конгломератами и углями. Мощность горизонта составляет 40–100 м. На контакте со вторым геоэлектриче-

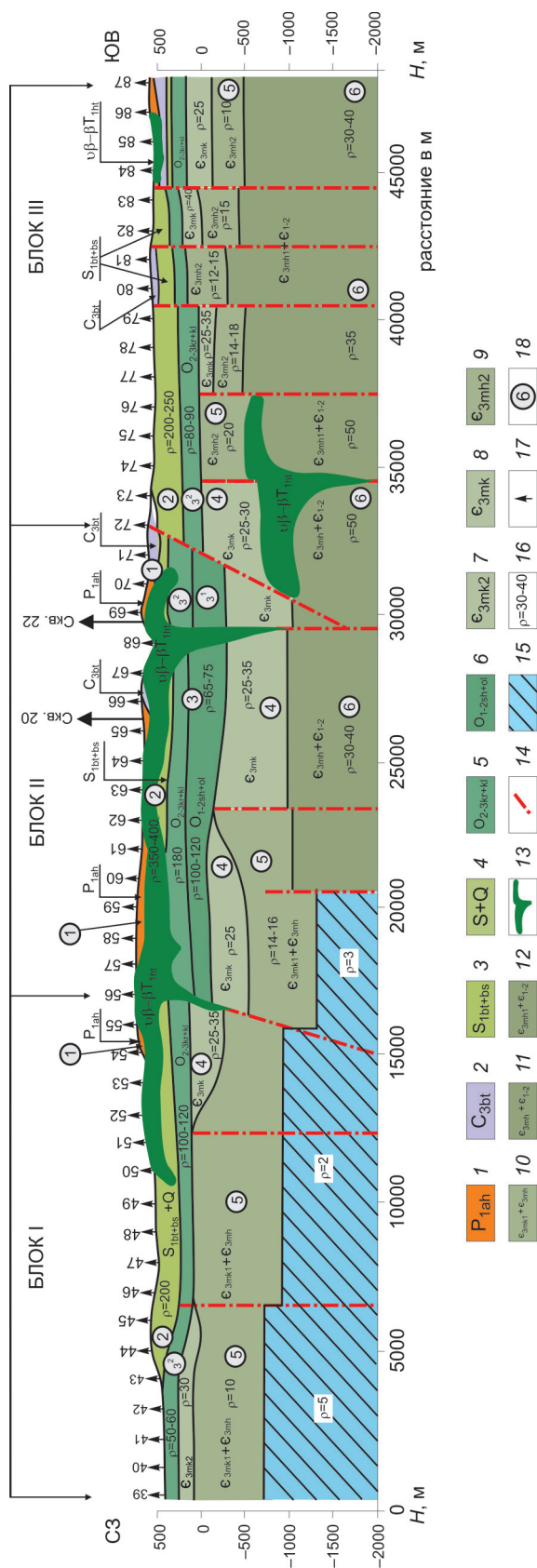


Рис. 7. Геоэлектрический разрез осадочного чехла:

1 – отложения ахтарандинской свиты верхней перми; 2 – отложения ботубинской свиты верхнего карбона; 3 – объединенные отложения байтахской и башенной свит нижнего силура; 4 – отложения яральинской, машковской и непердинской свит нижнего силура и нерасчлененные гравийно-галечные образования позднего неоплейстоцена и голоцена; 5 – объединенные отложения криволучской и кылахской свит среднего-верхнего ордовика; 6 – отложения сохолохской и олдондской свит нижнего-среднего ордовика; 7 – нерасчлененные отложения моркокинской свиты верхнего кембрия; 8 – отложения верхней посветы мархинской свиты верхнего кембрия; 9 – отложения верхнемархинской подсветы верхнего кембрия; 10 – объединенные отложения нижнемаркокинской подсветы и мархинской свиты верхнего кембрия; 11 – объединенные отложения мархинской свиты и нерасчлененные отложения нижнего-верхнего кембрия; 12 – объединенные отложения нижнемархинской подсветы верхнего кембрия и нерасчлененные отложения нижнего-среднего кембрия; 13 – пермо-триасовые долериты; 14 – разломы, предполагаемые по данным МТЗ; 15 – геоэлектрическая неоднородность с низкими значениями УЭС; 16 – значения УЭС в Ом · м; 17 – разведочные скважины; 18 – номера геоэлектрических горизонтов

Fig. 7. Geoelectric section of the sedimentary cover:

1 – deposits of the Akhtaranin formation of the Upper Permian; 2 – deposits of the botubinskaya formation of the upper carboniferous; 3 – combined deposits of the baytakh and tower formations of the lower silurian; 4 – deposits of the yaralinsk, mashkov and nepperdinsk formations of the lower silurian and undifferentiated gravel-pebble formations of the late pleistocene and holocene; 5 – combined deposits of the krivoluchskaya and kylahskaya formations of the middle-upper ordovician; 6 – sediments of the soxolokhskaaya and oldondinskaya formations of the lower-middle ordovician; 7 – undifferentiated deposits of the markokinskaya formation of the upper cambrian; 8 – deposits of the upper ordovician formation of the markokinskaya formation of the upper cambrian; 9 – deposits of the upper markokinskaya sub-formation of the upper cambrian; 10 – combined deposits of the upper markokinskaya sub-formation and the markokinskaya formation of the upper cambrian; 11 – combined deposits of the markokinskaya formation and undifferentiated deposits of the lower-upper cambrian; 12 – combined deposits of the lower-arhim sub-formation of the upper cambrian and undifferentiated deposits of the lower-middle cambrian; 13 – permo-triassic dolerites; 14 – faults assumed according to MTZ data; 15 – UES values with low UES values; 16 – UES values in Ohms · m; 17 – exploration wells; 18 – numbers of geoelectric horizons

ским горизонтом пермские и каменноугольные отложения перекрыты интрузивными телами долеритов. Среднее сопротивление горизонта порядка 200 Ом·м.

Второй (II) геоэлектрический горизонт включает объединенные отложения машковской и неперендинской (S_{lms+np}) свит и объединенные отложения байтахской и башенной (S_{bt+bs}) свит нижнего силура, а также нерасчлененные гравийно-галечные образования позднего неоплейстоцена и голоцена. Породы нижнего силура представлены глинистыми и алевритистыми известняками, доломитами, мергелями. Горизонт выдержан и по мощности, и по значениям удельного сопротивления, которые составляют 250–270 м и 210–250 Ом·м соответственно. Исключения составляют юго-восточное окончание профиля, где его мощность сокращается до 50–70 м, и северо-западное окончание (блок I, п.п. 39–43), где он полностью выклинивается (см. рис. 7).

Третий (III) геоэлектрический горизонт представлен отложениями ордовикской системы и подразделяется на два подгоризонта. В состав верхнего (III^2) подгоризонта входят объединенные отложения криволуцкой и кылахской ($O_{2-3 kr+kl}$) свит среднего–верхнего ордовика, представленные песчаниками, известняками, доломитами, прослоями алевролитов и аргиллитов. Мощность подгоризонта составляет 100–150 м. Значения УЭС уменьшаются от центральной части профиля в северо-западном и юго-восточном направлениях со 180 до 50–60 и 80–90 Ом·м соответственно. Нижний (III^1) подгоризонт приурочен к отложениям сохолохской ($O_{1-2 sh}$) свиты нижнего–среднего ордовика и олдондинской (O_{1ol}) свиты нижнего ордовика и развит только в центральной части профиля (блок II). Отложения данного горизонта представлены доломитами, известняками и мергелями. Их мощность нарастает в юго-восточном направлении с 250 (п.п. 56–62) до 400 м (п.п. 62–71). В этом же направлении уменьшаются значения УЭС со 100–120 до 65–75 Ом·м. IV, V и VI геоэлектрические горизонты приурочены к мощной толще разновозрастных кембрийских отложений (от ϵ_1 до ϵ_3) и характеризуют геоэлектрический разрез в интервале глубин 250–2000 м (см. рис. 7).

Четвертый (IV) геоэлектрический горизонт, включающий отложения моркокинской (ϵ_{3mk}) свиты верхнего кембрия, развит в центральной части профиля (блок II). Отложения этого горизонта представлены глинистыми известняками, мерге-

лями, аргиллитами, доломитами и песчаниками. Мощность его около 350 м, среднее удельное сопротивление 25–35 Ом·м. В первом блоке мощность сокращается, и верхняя подсвита (ϵ_{3mk2}) выклинивается в районе п.п. 5–52, а нижняя (ϵ_{3mk1}) входит в состав V геоэлектрического горизонта (см. рис. 7). На северо-западном окончании профиля (п.п. 39–46) мощность горизонта составляет 150–170 м и включает отложения только верхней подсвиты. В III блоке мощность IV горизонта не превышает 180 м и в районе п.п. 79–82 замещается пятым геоэлектрическим горизонтом.

Пятый (V) геоэлектрический горизонт, представленный известняками, доломитами и мергелями верхней подсвиты мархинской свиты верхнего кембрия (ϵ_{3mh2}), прослеживается только в пределах III блока (см. рис. 7). Мощность его составляет 350–400 м, среднее значение УЭС 10–15 Ом·м. В юго-восточной части центрального блока (п.п. 60–72) горизонт не прослеживается, а в северо-западной части и в I блоке в его состав входят породы нижней подсвиты моркокинской свиты (ϵ_{3mk1}) и мархинская свита (ϵ_{3mh}). Отложения представлены преимущественно глинистыми известняками и глинистыми доломитами. Для V геоэлектрического горизонта характерны самые низкие значения УЭС (10–15 Ом·м), обусловленные приуроченностью карбонатных разностей моркокинской и мархинской свит к повсеместно развитому верхнекембрийскому водоносному комплексу (ϵ_3). Состав подземных вод комплекса хлоридный магниевый-кальциевый и кальциевый-магниевый с минерализацией, достигающей 252 г/дм³ [1].

Шестой (VI) геоэлектрический горизонт прослеживается в юго-восточной части II блока (п.п. 60–72) и в III блоке (см. рис. 7). В состав горизонта входят отложения нижней подсвиты мархинской свиты (ϵ_{3mh1}) и нерасчлененные отложения нижнего–среднего кембрия (ϵ_{1-2}), представленные глинистыми доломитами, известняками и мергелями. Мощность горизонта увеличивается в юго-восточном направлении с 1000 до 1500 м. Значения УЭС варьируют от 30 до 50 Ом·м.

В пределах первого блока в этом интервале глубин выделяется мощная проводящая неоднородность с сопротивлением 2–5 Ом·м и латеральной протяженностью около 20 км (см. рис. 7). По данным гидрогеохимических исследований [1], частое переслаивание и интенсивная трещиноватость участков плотных известняков обусловили наличие нижнекембрийского (ϵ_1) водонос-

ного комплекса с подмерзлотными высокоминерализованными коллекторами, гидравлически связанными друг с другом. Состав рассолов комплекса хлоридный кальциевый, минерализация около 400 г/дм³.

Рассолоносные комплексы не содержат выдержанных пластов каменной соли, а сложены преимущественно гипсоносными карбонатными породами и интрузиями траппов, интенсивная тектоническая переработка которых обуславливает существование единой гидродинамической системы взаимосвязанных зон дробления, способных свободно дренировать рассолы во вмещающих породах [1]. Эти зоны формируют в магнитотеллурическом поле региональные высокопроводящие электрические аномалии.

По данным проведенных исследований, в осадочном чехле изученного профиля выделена серия дизъюнктивных нарушений, образующих систему структурных блоков (см. рис. 7). К настоящему времени установлено, что значительная часть кимберлитовых тел Алакит-Мархинского кимберлитового поля в пределах рудовмещающих разломов приурочена к структурным узлам, представляющим собой участки пересечения (сочленения) нескольких разноориентированных тектонических нарушений, имеющих максимальную проницаемость земной коры [6, 12, 14, 19, 20]. Кимберлитоконтролирующие разломы отражают на дневной поверхности унаследованные глубинные разломы первого порядка, которые в осадочном чехле разветвляются в разрывные нарушения второго и третьего порядков и затем постепенно переходят в зоны повышенной трещиноватости и дробления [13, 17, 24].

В результате региональных и среднемасштабных исследований методом МТЗ на Сибирской платформе установлено, что наряду с ореолами ИМК, гравимагнитными минимумами и повышенной сейсмической гетерогенностью земной коры дополнительным критерием прогнозирования кимберлитовых полей служит наличие проводящих субвертикальных неоднородностей на фоне высокоомного разреза консолидированной земной коры. АМКП располагается в пределах сложнопостроенной геоэлектрической неоднородности с глубиной залегания около 6 км и шириной более 55 км [4].

Данная неоднородность пространственно сопряжена с узлом пересечения Далдыно-Оленекской и Вилуйско-Котуйской зон глубинных раз-

ломов и представляет собой сочетание относительно высокоомных и проводящих блоков со значениями удельного сопротивления 50–100 и 5–20 Ом·м соответственно. К последним приурочены известные кимберлитовые тела Алакит-Мархинского поля, включая алмазные месторождения (рис. 8).

В пределах изученного профиля подобная проводящая зона выделяется в центральной части второго блока (п.п. 061–069) на фоне высокоомного разреза земной коры. Глубина залегания верхней кромки выделенной зоны составляет около 6 км, удельное сопротивление варьирует в пределах 6–10 Ом·м. Эта неоднородность накладывается на другую – более высокого порядка с явно выраженным наклоном ее боковых границ (рис. 9).

В верхней части разреза неоднородность соответствует зоне сочленения выделенных I и II блоков. Согласно предыдущим результатам исследований большинства геологов [11, 12], именно подобные структуры наиболее благоприятны для проявления кимберлитового магматизма. Аналогичные геолого-структурные предпосылки установлены на участках развития кимберлитовых тел, выявленных в последние годы геологами в АМКП [12, 13]. По нашему мнению, эти геофизические признаки, подкрепленные и усиленные геолого-тектоническими, петрологическими и минералого-геохимическими предпосылками [25, 30], хорошо зарекомендовавшими себя при выявлении кимберлитовых тел в хорошо изученных районах [27], могут рассматриваться в качестве дополнительных критериев прогнозирования новых кимберлитовых объектов в районах со сложной геологической обстановкой.

Выводы

1. Особенности УЭС в пределах АМКП позволяют выделить в геоэлектрическом разрезе изученного профиля три крупных структурных блока, ограниченных зонами тектонических нарушений: северо-западный (блок I), центральный (блок II) и юго-восточный (блок III).

2. В структуре осадочного чехла I и III блоки представляют собой валлообразные поднятия, а центральный – грабенообразный прогиб. Протяженность поднятий и прогиба составляет, соответственно, 17, 16 и 15 км. В пределах второго блока отмечены триасовые долеритовые интрузии мощностью от 150 до 450 м и латеральной протяженностью до 20 км.

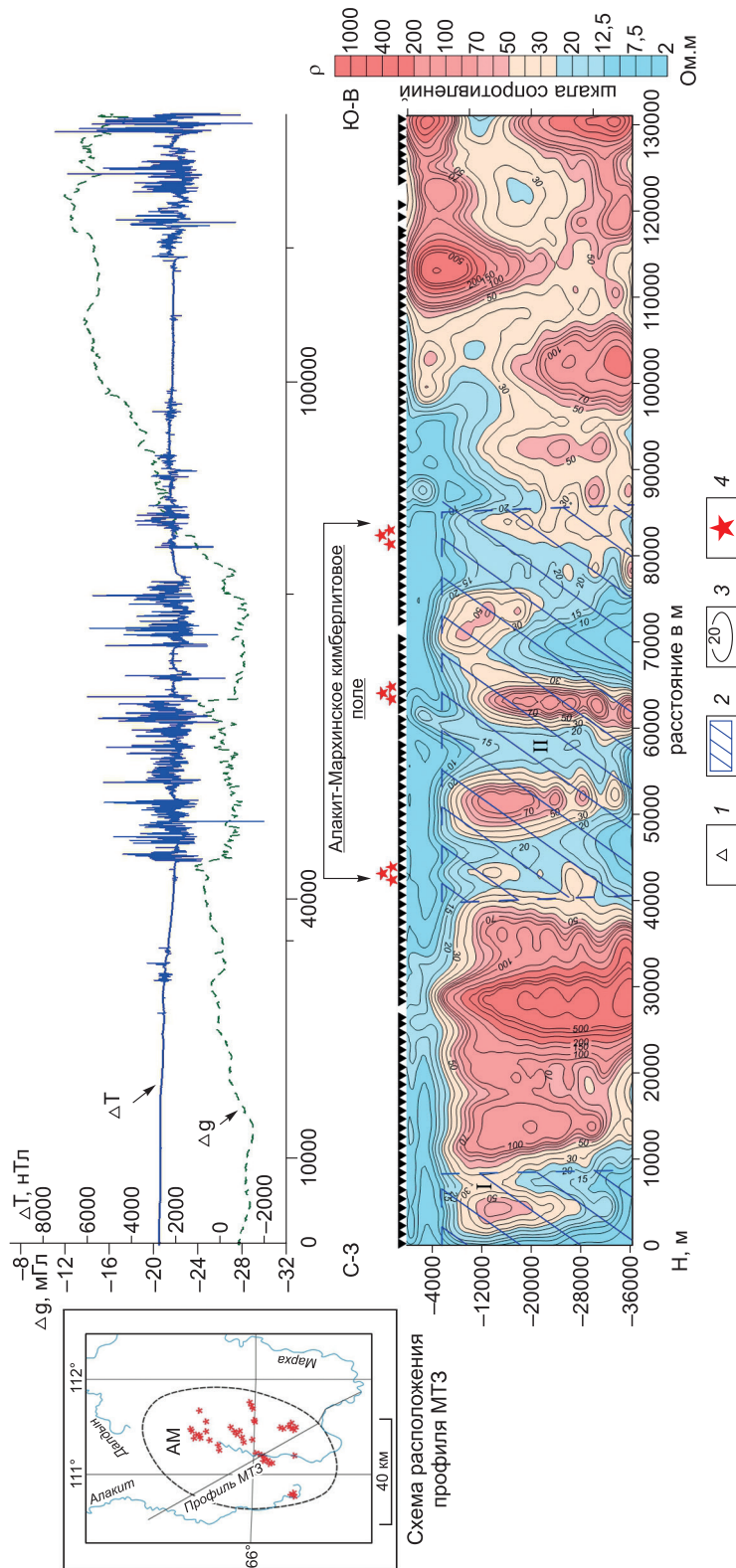


Рис. 8. Глубинный геоэлектрический разрез через Алакит-Мархинское кимберлитовое поле:
1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – контуры проводящих неоднородностей; 3 – изолинии УЭС в Ом·м; 4 – кимберлитовые трубки

Fig. 8. Deep geoelectric section through the Alakit-Markha kimberlite field:
1 – magnetotelluric sounding points; 2 – contours of conducting inhomogeneities; 3 – UES isolines in ohms m; 4 – kimberlite tubes

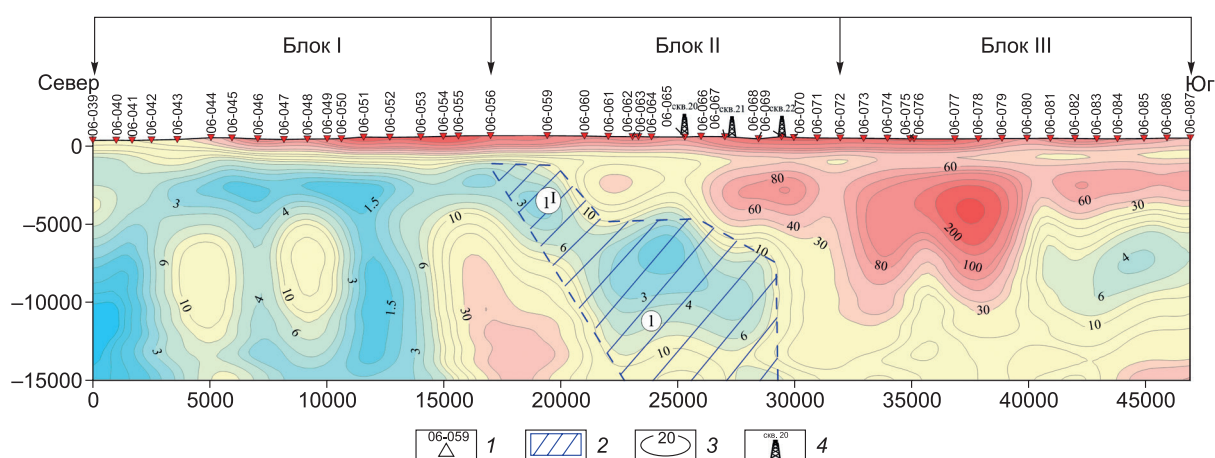


Рис. 9. Глубинный геоэлектрический разрез юго-западной части Алаakit-Мархинского кимберлитового поля:

1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – проводящая неоднородность; 3 – изолинии УЭС в Ом · м; 4 – скважины разведочного бурения

Fig. 9. Deep geoelectric section of the southwestern part of the Alakite-Markhinsky kimberlite field:

1 – magnetotelluric sounding points; 2 – conducting heterogeneity; 3 – UES isolines in Ohms m; 4 – exploration drilling wells

3. В осадочном чехле АМКП выделяется серия структурных блоков – участков, ограниченных разноориентированными тектоническими нарушениями, выделяющихся в геоэлектрическом разрезе по максимальной проницаемости земной коры.

4. Геоэлектрический разрез консолидированной коры I и III структурных блоков характеризуется преобладанием абсолютно низких значений УЭС, обусловленных экранирующим влиянием проводящей аномальной зоны, приуроченной к отложениям верхнего кембрия.

5. В центральной части II структурного блока на фоне высокоомного разреза земной коры отчетливо выделяется проводящая неоднородность со значениями УЭС 6–10 Ом · м и глубиной залегания верхней кромки 6 км, накладывающаяся на неоднородность более высокого порядка с явно выраженным наклоном боковых границ. В верхней части разреза она соответствует зоне сочленения первого и второго структурных блоков.

6. По совокупности геолого-геофизических и геохимических данных следует уверенно констатировать, что центральная часть изученного профиля (блок II) является наиболее перспективной для прогнозирования новых алмазоносных объектов разряда отдельных кимберлитовых тел.

Список литературы / References

1. Алексеев С.В., Алексеева Л.П. Литиеносные россыли Далдыно-Алаkitского района (Западная Якутия). *География и природные ресурсы*. 2008;(2):103–109.

Alekseev S.V., Alekseeva L.P. Lithium-bearing brines of the Daldino-Alakitskiy district (Western Yakutia). *Geography and natural resources*. 2008;(2):103–109. (In Russ.)

2. Арсеньев А.А. Трещинная тектоника и алмазность восточной части Сибирской платформы. В кн.: Рожков И.С. (ред.). *Геология алмазных месторождений. Серия геологическая*. М.: Акад. наук СССР; 1963:39–44.

Arseniyev A.A. Fractured tectonics and diamond bearing of the eastern part of the Siberian platform. In: Rozhkov I.S. (ed.) *Geology of diamond deposits. Geological series*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1963:39–44. (In Russ.)

3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. *Модели и методы магнитотеллурики*. М.: Научный мир; 2009. 679 с. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. *Models and methods of magnetotellurics*. Moscow: Nauchnyi mir; 2009. (In Russ.)

4. Бессмертный С.Ф., Поспеева Е.В., Овчинникова О.И. Изучение особенностей строения консолидированной коры Далдыно-Алаkitского района по данным региональной сейсморазведки МОВ-ОГТ и электроразведки МТЗ. В кн.: *Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: Материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» г. Мирный, 18–20 марта 2008 г.* Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН; 2008. С. 55–62.

Bessmertny S.F., Pospeeva E.V., Ovchinnikova O.I. Studying specific features of Daldyn-Alakit diamondiferous region consolidated crust structure according to regional seismics data by CMP method and electrical prospecting by MT sounding. In: *Problems of forecasting and prospecting of diamond deposits on closed territories: Proceedings of the conference dedicated to the 40th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK ALROSA, Mirny*,

March 18–20, 2008. Yakutsk: YaSC SB RAS Publishing House; 2008, pp. 55–62. (In Russ.)

5. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир; 1997. 218 с.

Van'yan L.L. *Electromagnetic sensing*. Moscow: Nauchnyi mir; 1977. 218 p. (In Russ.)

6. Гапотченко П.И., Морозова Н.Е. Разломы и кимберлитовый магматизм Далдыно-Алакитского кимберлитового района. В кн.: *Геология минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, г. Якутск, 05–07 апреля 2017 года. Том II*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2017. С. 432–439.

Gapotchenko P.I., Morozova N.E. Faults and kimberlite magmatism of the Daldyn-Alakit kimberlite region. In: *Geology mineral resources of the Northeast of Russia: Proceedings of the 7th All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, April 05–07, 2017, V. 2*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2017, pp. 432–439. (In Russ.)

7. Горев Н.И. Тектонические исследования при прогнозировании коренных источников алмазов. В кн.: Зинчук Н.Н. (ред.). *Геология алмазов – настоящее и будущее: Геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России*. Воронеж: Воронежский государственный университет; 2005. С. 1175–1202.

Gorev N.I. Tectonic studies in predicting the primary sources of diamonds. In: Zinchuk N.N. (ed.). *Geology of diamonds – present and future: Geologists on the 50th anniversary of Mirny and diamond mining industry in Russia*. Voronezh: Voronezh State University; 2005, pp. 1175–1202. (In Russ.)

8. Зинчук Н.Н. Постмагматические минералы кимберлитов. М.: Недра; 2000. 537 с.

Zinchuk N.N. *Postmagmatic minerals of kimberlites*. Moscow: Nedra; 2000. 538 p. (In Russ.)

9. Зинчук Н.Н. О контроле кимберлитового магматизма рифтогенными структурами. *Руды и металлы*. 2015;(4):51–66.

Zinchuk N.N. About control of kimberlite magmatism by rift-related structures. *Ores and Metals*. 2015;(4):51–66. (In Russ.)

10. Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. *Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород*. М.: Недра; 2002. 694 с.

Zinchuk N.N., Bondarenko A.T., Garat M.N. *Petrophysics of kimberlites and their country rocks*. Moscow: Nedra; 2002. 694 p. (In Russ.)

11. Иванов Д.В., Салихов Р.Ф., Толстов А.В. и др. Особенности поисков кимберлитов в пределах Алакит-Мархинского поля. В кн.: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конфе-*

ренции, посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, г. Якутск, 05–07 апреля 2017 года. Том I. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2017. С. 266–271.

Ivanov D.V., Salikhov R.F., Tolstov A.V., et al. Features of kimberlite prospecting within the Alakit-Markha field. In: *Geology and mineral resources of the Northeast of Russia: Proceedings of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, April 05–07, 2017, V. 1*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2017, pp. 266–271. (In Russ.)

12. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Структурно-тектонические критерии поисков кимберлитовых тел в Алакит-Мархинском поле. *Руды и металлы*. 2019;(2):55–60. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10014>

Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Structural and tectonic criteria for searching for kimberlite bodies in the Alakit-Markha field. *Ores and metals*. 2019;(2):55–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10014>

13. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Роль пликативных структур как прогнозных критериев на алмазоносные кимберлиты в Алакит-Мархинском поле. *Руды и металлы*. 2021;(3):6–13. <https://rm.tsnigri.ru/index.php/main/article/view/145>

Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. The role of plicative structures as forecast criteria for diamond-bearing kimberlites in the Alakit-Markhinsky field. *Ores and metals*. 2021;(3):6–13. (In Russ.). <https://rm.tsnigri.ru/index.php/main/article/view/145>

14. Караев Н.А., Биезайс Я.Я., Лебедин П.А. Связь кимберлитовых полей с трансоровыми и корово-мантийными структурами, отображаемыми в аномалиях сейсмических моделей гетерогенных систем. *Технологии сейсморазведки*. 2008;(1):80–90.

Karaev N.A., Biezais Ya.Ya., Lebedkin P.A. Relationship of kimberlite fields with transcrustal and crust-mantle structures displayed in anomalies of seismic models of heterogeneous systems. *Seismic technologies*. 2008;(1):80–90. (In Russ.)

15. Костровицкий С.И., Яковлев Д.А., Алымова Н.В. Кимберлитовый вулканизм Якутской провинции – тектонический контроль, мантийные источники. В кн.: Гордеев Е.И. (ред.). *Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, г. Петропавловск-Камчатский, 22–27 сентября 2009 г.* Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 2009. С. 381–384.

Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., Alyмова N.V. Kimberlite volcanism of the Yakut province – tectonic control, mantle sources. In: Gordeev E.I. (ed.). *Proceedings of the 4th All-Russian symposium on volcanology and paleovolcanology, Petropavlovsk-Kamchatsky, September 22–27, 2009*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of

- the Russian Academy of Sciences; 2009, pp. 381–384. (In Russ.).
16. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Тектонические критерии выделения таксонов кимберлитового магматизма Архангельской алмазоносной провинции. В кн.: *Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минералогия Северо-Запада России: Материалы Всероссийской конференции, г. Петрозаводск, 12–15 ноября 2007 г.* Петрозаводск: Институт геологии Карельского Научного центра РАН; 2007. С. 226–230.
- Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. Tectonic criteria for the allocation of taxa of kimberlite magmatism of the Arkhangelsk diamond-bearing province. In: *Geodynamics, magmatism, sedimentogenesis and mineralogy of the North-West of Russia: Proceedings of the All-Russian conference, Petrozavodsk, November 12–15, 2007.* Petrozavodsk: Institute of Geology of the Karelian Research Center RAS; 2007, pp. 226–230. (In Russ.).
17. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов. *Вестник ВГУ. Серия: Геология.* 2016;(3):86–94.
- Maltsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. New kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology.* 2016;(3):86–94. (In Russ.).
18. Манаков А.В., Романов Н.Н., Полторацкая О.Л. *Кимберлитовые поля Якутии.* Воронеж: Воронежский госуниверситет; 2000. 82 с.
- Manakov A.V., Romanov N.N., Poltoratskaya O.L. *Kimberlite fields in Yakutia.* Voronezh: Voronezh State University, 2000. P. 82. (In Russ.).
19. Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В., Санчаа А.М. Интерпретация данных комплексных электромагнитных методов в сейсмоактивных районах (на примере Чуйской впадины Горного Алтая). *Физика Земли.* 2011;(11):63–75.
- Nevedrova N.N., Pospeeva E.V., Sancha A.M. Interpretation of the data of complex electromagnetic methods in seismically active areas (on the example of the Chui depression of the Altai Mountains). *Physics of the Earth.* 2011;(11):63–75. (In Russ.).
20. Подчасов В.М., Минорин В.Е., Богатых И.Я. и др. *Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки коренных месторождений алмазов. Кн. 1. Коренные месторождения.* Якутск: Издательство СО РАН; 2004. С. 548.
- Podchasov V.M., Minorin V.E., Bogath I.Y., et al. *Geology, forecasting, methods of prospecting, evaluation and exploration of primary diamond deposits. Book 1. Primary deposits.* Yakutsk: SB RAS Publishing House; 2004. P. 548. (In Russ.).
21. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. и др. *Современная практическая электроразведка.* Новосибирск: Академическое издание «Гео»; 2018. 231 с. <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>
- Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., et al. *Modern applied electroprospecting.* Novosibirsk: “Geo”; 2018. P. 231. (In Russ.). <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>
22. Поспеева Е.В. *Электромагнитные исследования Якутской алмазоносной провинции:* Автореф. дис. ... канд. геол. минерал. наук. Иркутск; 1990. 20 с.
- Pospeeva E.V. *Electromagnetic studies of the Yakut diamond-bearing province:* Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Irkutsk; 1990. 20 p. (in Russ.).
23. Поспеева Е.В., Поспеев В.И. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазоносной провинции. В кн.: Михалевский В.И. (ред.). *Обеспечение научно-технического прогресса геофизических исследований в Восточной Сибири.* Иркутск; Новосибирск: СНИИГГИМС; 1987. С. 107–116.
- Pospeeva E.V., Pospeev V.I. Results of deep magnetotelluric studies in the Yakut diamond-bearing province. In: Mikhalevsky V.I. (ed.). *Ensuring scientific and technological progress of geophysical research in Eastern Siberia.* Irkutsk; Novosibirsk: SNIIGGIMS; 1987, pp. 107–116. (In Russ.).
24. Проценко Е.В., Толстов А.В., Горев Н.И. Критерии поисков кимберлитов и новые перспективы коренной алмазоносности Якутии. *Руды и металлы.* 2018;(4):14–28. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10009>
- Protsenko E.V., Tolstov A.V., Gorev N.I. Kimberlite prospecting criteria and new prospects for Yakutia primary diamond potential. *Ores and metals.* 2018;(4):14–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10009>
25. Соболев Н.В., Соболев А.В., Томиленко А.А. и др. Перспективы поисков алмазоносных кимберлитов в северо-восточной части Сибирской платформы. *Геология и геофизика.* 2018;59(10):1365–1379. <https://doi.org/10.15372/GiG20181012>
- Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., et al. Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform. *Geology and geophysics.* 2018;59(10):1365–1379. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20181012>
26. Суворов В.Д., Мельник Е.А., Манаков А.В. Глубинное строение Далдыно-Алакитского кимберлитового района по данным ГСЗ и гравитационного моделирования (Западная Якутия). *Физика Земли.* 2005; (5):35–47.
- Suvorov V.D., Melnik E.A., Manakov A.V. Structure of the Daldin-Alakit kimberlite area (Western Yakutia) from DSS data and gravity modeling results. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2005;(5):35–47. (In Russ.).
27. Толстов А.В., Разумов А.Н., Минин В.А. и др. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской кимберлитовой провинции. *Геология и геофизика.* 2009;50(3):227–240.
- Tolstov A.V., Razumov A.N., Minin V.A., et al. A new body of highly diamond-bearing kimberlites in the Nakyn field of the Yakut kimberlite province. *Geology and geophysics.* 2009;50(3):227–240. (In Russ.).

28. Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. *Коренные месторождения алмазов мира*. М.: Недра; 1998. 555 с.

Harkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. *The primary diamond deposits in the world*. Moscow: Nedra, 1998. P. 555. (In Russ).

29. Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *Journal of Geophysics*. 1988;62(1):119–127.

30. Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites. *Geochemistry International*. 2007;45(12):1197–1209. <https://doi.org/10.1134/S0016702907120026>

31. Swift C.M. *A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States*. Ph.D. Dissertation, MIT. Cambridge 1967. 211 p.

Об авторах

ПОСПЕЕВА Елена Валентиновна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>, SPIN: 9960-1010, e-mail: pospeevaev@ipgg.sbras.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN:7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

About the authors

POSPEEVA, Elena Valentinovna, Dr. Sci (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>, SPIN: 9960-1010, e-mail: pospeevaev@ipgg.sbras.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilevich, Dr. Sci (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN:7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 17.06.2023

Поступила после рецензирования / Revised 11.12.2023

Принята к публикации / Accepted 24.01.2024