

**EXPERIENCE OF USING ELECTRICAL TOMOGRAPHY, RADON SURVEY
AND MICROSEISMIC SOUNDING IN SEARCH FOR PIPES CONTROLLED BY FAULT ZONES****K.Zh. Seminsky, S.A. Bornyakov, A.A. Bobrov, A.N. Shagun**

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

ABSTRACT. The complex of geophysical methods was successfully applied in the Alakit-Markha kimberlite field of the Yakutsk diamondiferous province. A pipe was identified in the local forecast area specified within the field at the previous stage of prospecting. The studies using electric tomography (ET), radon survey (RS) and microseismic sounding (MS) covered an area of $\approx 1000 \times 500$ m. Based on the jointly processed ET and RS plan images and MS profiles, a tubular body was detected in the sedimentary cover. It is confined to a fault node and stands out among the host rocks by low electrical resistivity, increased soil radon concentrations and high spectral ratios of the horizontal and vertical components of microseisms. Its complex shape is manifested at the ground surface by two isometric structures (each being several hundred meters long), which jointly form a dike-like body at a depth of ≈ 40 m, as shown by the electrical tomography images. According to the MS data, its root part is detected to comprise one or two fractured narrow zones that are traceable to a depth of 2 km and below. The structure of the identified body and its chemical composition will be determined after exploratory drilling is complete. Today there are grounds to conclude that using ET, RS and MS methods jointly as a complex described in the article proved effective for identifying pipes controlled by fault zones in the sedimentary cover areas.

KEYWORDS: pipe; Alakit-Markha kimberlite field (Yakutia); local forecast; electrical tomography; radon survey; microseismic sounding; fault zone; structural trap

FUNDING: The studies were carried out under the state assignment of the Institute of the Earth's Crust SB RAS as part of the basic budget project of the Laboratory of Tectonophysics.

SHORT COMMUNICATION

Received: April 13, 2020

Revised: May 11, 2020

Accepted: May 14, 2020

FOR CITATION: Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Bobrov A.A., Shagun A.N., 2020. Experience of using electrical tomography, radon survey and microseismic sounding in search for pipes controlled by fault zones. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (2), 431–446. doi:10.5800/GT-2020-11-2-0484

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ, РАДОНОВОЙ СЪЕМКИ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ ТРУБОЧНОГО ТИПА, КОНТРОЛИРУЕМЫХ РАЗЛОМНЫМИ ЗОНАМИ

К.Ж. Семинский, С.А. Борняков, А.А. Бобров, А.Н. Шагун

Институт земной коры Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлен успешный опыт применения комплекса геофизических методов для выявления трубчатого тела на локальной прогнозной площади, выделенной на предварительном этапе поисковых работ в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции. Электротомография (ЭТ), радоновая съемка (РС) и микросейсмическое зондирование (МЗ) были реализованы на территории размером $\approx 1000 \times 500$ м в площадном (ЭТ и РС) и профильном (МЗ) вариантах. Комплексная обработка полученных материалов позволила установить наличие в осадочном чехле трубчатого тела, которое приурочено к узлу пересечения разломных зон и выделяется среди вмещающих пород низкими значениями удельного электрического сопротивления, повышенными концентрациями почвенного радона и высокими соотношениями спектров горизонтальной и вертикальной компонент микросейсм. Оно имеет сложную форму и проявлено у поверхности в виде двух изометричных структур размерами в первые сотни метров, которые, по данным электротомографии, образуют на глубине ≈ 40 м одно дайкоподобное тело. Корневая часть тела, судя по материалам МЗ, представлена одной или двумя узкими нарушенными зонами, которые прослеживаются до глубины 2 км и более. Решение вопроса о структурно-вещественном составе выявленного тела – прерогатива поискового бурения, тогда как на реализованной стадии работ комплекс из трех описанных в статье методов представляется эффективным для выявления трубчатых тел, контролируемых в осадочном чехле сетью разломных зон.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубчатое геологическое тело; Алакит-Мархинское кимберлитовое поле в Якутии; локальный прогноз; электротомография; радоновая съемка; микросейсмическое зондирование; разломная зона; структурная ловушка

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены по госзаданию Института земной коры СО РАН в рамках базового бюджетного проекта лаборатории тектонофизики.

1. ВВЕДЕНИЕ

Особый интерес к поиску геологических тел, имеющих трубчатую форму, определяется тем, что с диатремами связан большой комплекс разнотипных полезных ископаемых. Широко известна приуроченность месторождений алмаза к так называемым «трубкам взрыва», являющимся каналами для продвижения к поверхности магм различного состава [Crockett, Mason, 1968; Milashev, 1984; White et al., 1995; Khar'kiv et al., 1998; Bogatikova, 1999; Vaganov, 2000; Fon der Flaass, Nikulin, 2000; Nikulin et al., 2001; Kurszlaukis, Barnett, 2003; Gurney et al., 2005; Rosen et al., 2006; Kjarsgaard, 2007; Jelsma et al., 2009; Yakubchuk, 2009; Seminsky K., Seminsky Zh., 2016; и мн. др.]. Большой комплекс рудных полезных ископаемых (золото, серебро, молибден, медь, олово, железо и др.) ассоциируется с криптовулканическими трубками, которые формируются в результате воздействия на кору восходящих растворов, содержащих существенную газовую компоненту [Emmons, 1938; Borsuk, Masurenkov, 1964; Tugovik, 1984; Warnaars, 1985; Skewes, Stern, 1994; Corbett, Leach, 1996; Vogelmann, 1998; Chen et al., 2009; Endogenous Ore-Bearing Breccia Formations, 2018; и мн. др.].

Как правило, для прорыва к поверхности подвижный субстрат – магма или флюид – использует ослабленные зоны (и узлы их пересечения), которыми являются

разломы земной коры в их широком тектонофизическом понимании [Sherman et al., 1983; Seminsky, 2003; Seminsky K., Seminsky Zh., 2016]. Они представляются как объемные геологические тела, внутренняя структура которых развивается стадийно, эволюционируя в целом от многочисленных опережающих разрывов 2-го порядка через их избирательный рост и объединение к единому магистральному сместителю (разрыв 1-го порядка). Таким образом, в объем понятия «разломная зона» включаются не только объекты, представленные сместителем 1-го порядка и разрывами оперения, но и зоны распространения парагенетически связанных, сравнительно мелких разрывов 2-го порядка, в которых еще не сформировался магистральный сместитель. В прикладной геологии для обозначения подобных зон используют разные термины: зоны повышенной трещиноватости, зоны скрытых разломов фундамента, геодинамически активные зоны и пр. Объединение, согласно представлениям тектонофизики, подобных дизъюнктивных структур в единую по генезису группу объектов – разломные зоны разных стадий развития – позволяет увидеть их значимое влияние в локализации подавляющего большинства рудоносных диатрем.

У этого тезисного положения есть, по крайней мере, два следствия, имеющих прямое отношение к проблеме поисков рудоносных тел трубчатой формы. Во-первых,

фактор их структурного контроля разломными зонами должен подвергаться комплексному анализу на всех масштабных уровнях поисковых работ с выходом на прогноз мест потенциальной локализации, примерами которых являются приоткрывающиеся изгибы сместителей, впадины пулл-апарт, узлы пересечения и сочленения ослабленных зон и др. Во-вторых, динамическая обстановка формирования и последующего деформационного преобразования трубок взрыва в разломной зоне приводит к их высокой и неоднородной дислоцированности. Из этого следует, что первоочередными задачами на стадии поисков трубочных тел являются выделение зон крупных разломов и расшифровка их внутренней разрывной структуры с локализацией участков высокой нарушенности горных пород. Обычно реализация этих задач обеспечивается структурно-геологическими методами, однако в условиях слабой обнаженности территории опосредования они малоэффективны, что диктует необходимость использования комплекса геофизических методов.

Круг поднятых вопросов в большой степени относится к проблеме поиска алмазоносных кимберлитовых трубок, поскольку такие методы, как шлиховое опробование на минералы-спутники алмаза или магниторазведка, становятся все менее и менее эффективными по мере открытия объектов, выходящих на поверхность. Как следствие, необходимость комплексирования геофизических методов при поисках трубок констатируется в подавляющем большинстве современных публикаций по проблеме. Что касается исследования и учета разломного фактора, то после продолжительного периода углубленного изучения вещества в алмазопроисходительной отрасли имеет место определенная активизация структурного направления исследований [Vaganov, 2000; Serokurov et al., 2001; Nikulin et al., 2001; Gladkov et al., 2008; Kurszlaukis, Barnett, 2003; Ignatov et al., 2009, 2010; Kiselev et al., 2009; Jelsma et al., 2009; Evstratov, 2015; Ramadass et al., 2015; Guha et al., 2018; и мн. др.].

В рамках этого направления авторский коллектив некоторое время назад разработал новый подход к локальному прогнозу трубочных тел [Seminsky K., Seminsky Zh., 2016], основу которого составил оригинальный метод специального структурного картирования разломных зон, дополненный современными приемами линеаментного анализа рельефа, лабораторным моделированием механизмов разрывообразования на упругопластичном материале, а также новыми способами тектонофизического анализа натуральных и экспериментально воспроизведенных разломных сетей. Исследования проводились в Якутской алмазоносной провинции на примере Алакит-Мархинского кимберлитового поля (рис. 1, а, б), где поиск трубочных тел традиционными методами осложнен наличием траппов в самой верхней части разреза. Для этих условий были углублены представления о факторах структурного контроля кимберлитов и детализированы признаки их локализации в разнотипных элементах разрывной сети. Таким образом, был разработан формализованный подход к

алмазопроисходительным прогнозным исследованиям, включающий надрегиональную, а также детально представленные региональную и локальную составляющие.

Результаты этих работ, проведенных на разных масштабных уровнях, подробно описаны в монографии [Seminsky K., Seminsky Zh., 2016] и представлены на рис. 1. На региональном уровне, т.е. уровне кимберлитового поля (рис. 1, б), были посредством линеаментного анализа цифровой модели рельефа выделены разноранговые разломные зоны, затем на базе применения к их сети эталонных парагенезисов установлены главные типы полей напряжений и соответствующие им этапы тектонического развития территории, и, наконец, выделены перспективные участки, которые представляют места растяжения в разломных зонах, приуроченные к их приоткрывающимся изгибам или узлам пересечения. Данные этих исследований по большому счету подтвердили результаты работ М.И. Лелюха с коллегами [Lelyukh et al., 1989], а впоследствии и других геологов Амакинской экспедиции. Они выделили в качестве наиболее перспективного на уровне кимберлитового поля прямоугольный участок «Полигон», включающий сегмент крупной Центральной разломной зоны, с которой ассоциируются крупнейшее месторождение алмазов Трубка Юбилейная и несколько небольших кимберлитовых тел, вскрытых бурением.

Итогом описанных в монографии [Seminsky K., Seminsky Zh., 2016] прогнозных работ локального уровня стала схема разломных зон участка «Полигон» (рис. 1, в), на которой показаны сегменты разломной сети, представляющие по данным тектонофизического моделирования структурные ловушки вследствие условий растяжения, возникающих в этих местах на этапе внедрения кимберлитовой магмы. Из 11 известных для «Полигона» кимберлитовых трубок две попали в контуры прогнозных площадок, пять располагаются на их границах, а четыре – на некотором удалении от последних. В этих условиях экономически целесообразна постановка до этапа затратного поискового бурения детальных геофизических работ, целью которых является выделение в пределах прогнозных площадок аномалий, имеющих трубочную форму.

В настоящее время для достижения подобной цели предлагают разные комплексы методов, но многие исследователи алмазоносных провинций в качестве ключевой составляющей предлагают использовать мало-глубинные электроразведочные методы [Macnae, 1979; Arnott, Kostlin, 2003; Abramov, 2008; Cunion, 2009; Sarav et al., 2010; Stogniy, Korotkov, 2010; Viezzoli, Kaminski, 2016; Mikoev, 2018]. Кимберлит, нарушенный вблизи поверхности под воздействием тектонических или экзогенных процессов, зачастую отчетливо выделяется более высокой электропроводностью по сравнению с вмещающей породой. Для оконтуривания границ трубки в пределах российских алмазоносных регионов оказались эффективны радиометрические исследования, поскольку в приконтактной части может иметь место нарушение векового равновесия изотопов урана, а также

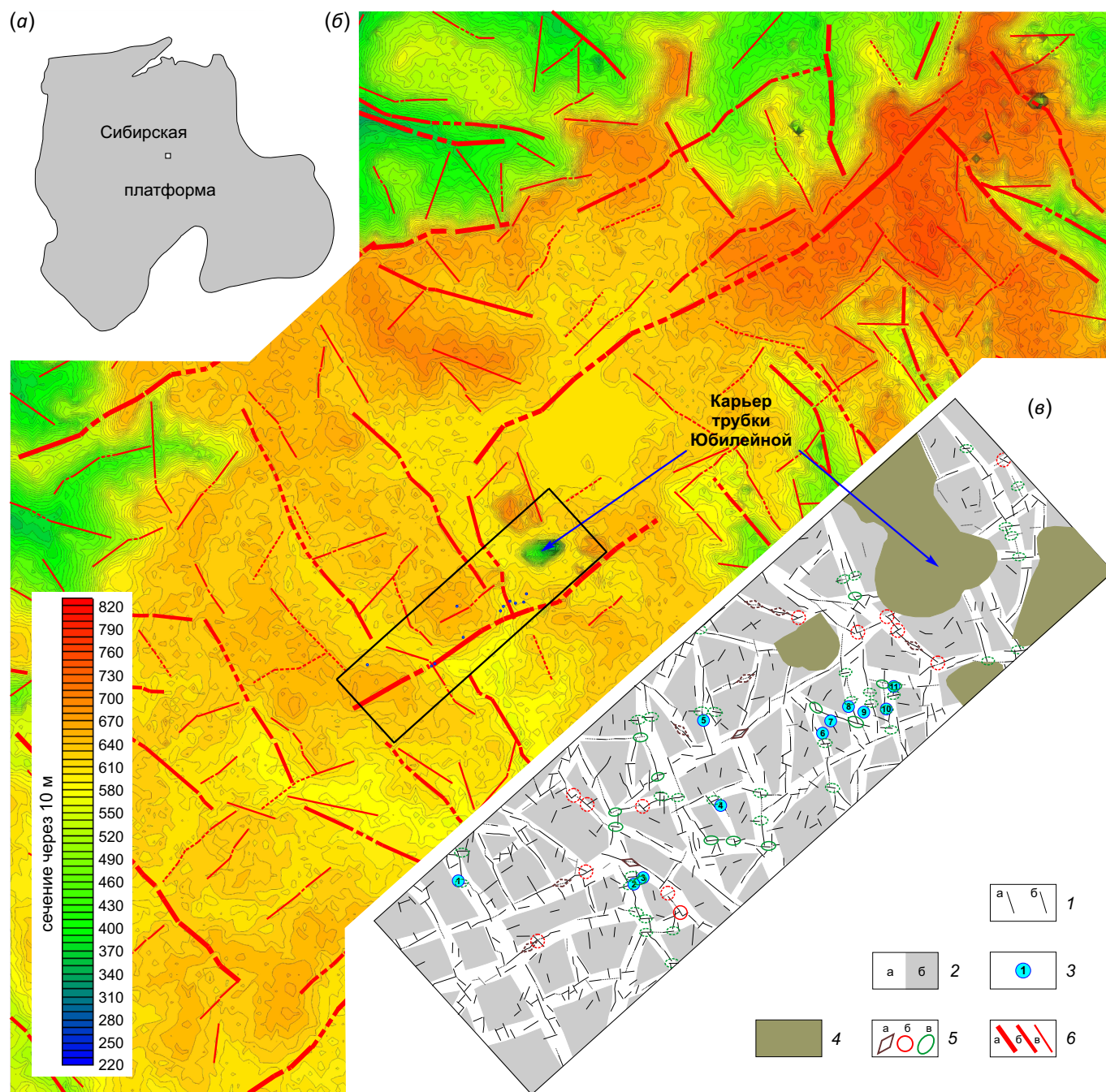


Рис. 1. Сети разноранговых дизъюнктивных структур в районе исследований [Seminsky K., Seminsky Zh., 2016].

(а) – местонахождение Алаakit-Мархинского кимберлитового поля в пределах Сибирской платформы; (б) – оси разноранговых разломных зон Алаakit-Мархинского поля, показанные на карте его рельефа; (в) – схема разломных зон участка «Полигон», на которой показаны прогнозные площадки, связанные с разнотипными структурными ловушками в разрывной сети. 1 – крупные (а) и мелкие (б) разрывные структуры на участке «Полигон» (пунктир – предполагаемое положение); 2 – участки, принадлежащие разломным зонам (а) и блокам (б); 3 – кимберлитовые трубки в пределах участка «Полигон» (прямоугольный контур) и их номера (1 – Кыллахская, 2 – Файнштейновская-1, 3 – Файнштейновская-2, 4 – Амакинская, 5 – Одинцова, 6 – Щукина, 7 – Радиоволновая, 8 – Соболева, 9 – Устинова, 10 – Бабкова, 11 – ЦНИГРИ); 4 – территории с существенным техногенным изменением ландшафта; 5 – структурная ловушка: а – у приоткрывающегося изгиба на северо-западном левом или восток-северо-восточном правом сдвиге, б – в узле взаимодействия северо-западного и восток-северо-восточного разрывов, в – в сочленении широтного и северо-восточного или широтного и север-северо-западного разрывов (пунктирный контур – ловушки, менее перспективные для обнаружения кимберлитовых трубок); б – оси разноранговых разломных зон в пределах Алаakit-Мархинского поля (пунктир – предполагаемое положение).

Fig. 1. Networks of multi-rank disjunctive structures in the study area [Seminsky K., Seminsky Zh., 2016].

(а) – Alakit-Markha kimberlite field within the Siberian craton; (б) – axes of fault zones differing in ranks in the Alakit-Markha field, shown on the topographic map; (в) – schematic map of fault zones on the Polygon site; the map shows local forecast areas associated with heterogeneous structural traps in the fault network. 1 – large (а) and small (б) faults on the Polygon site (dashed line – assumed

position); 2 – areas belonging to fault zones (a) and blocks (б); 3 – kimberlite pipes within the Polygon site (box) and their numbers (1 – Killakh, 2 – Fainshtein-1, 3 – Fainshtein-2, 4 – Amakin, 5 – Odintsov, 6 – Schukin, 7 – Radiovolnovaya, 8 – Sobolev, 9 – Ustinov, 10 – Babkov, 11 – TsNIGRI); 4 – territories with significant technogenic changes in the landscape; 5 – structural trap: a – at the opening bend on the north-western left-lateral or east-north-eastern right-lateral fault, б – at the junction of the north-western and east-north-eastern faults, в – at the junction of the latitudinal and north-eastern or latitudinal and north-north-western faults (dashed contour – traps that are less promising for the detection of kimberlite pipes); 6 – axis of fault zones differing in ranks within the Alakit-Markha field (dashed line – assumed position).

повышение концентрации радиоактивных элементов [Ukhanov et al., 1982; Nikulin et al., 2001; Kiselev et al., 2016; Endogenous Ore-Bearing Breccia Formations, 2018]. Из малозатратных сейсморазведочных методов в Архангельской провинции хорошо зарекомендовало себя микросейсмическое зондирование, позволяющее исследовать более глубокую, корневую, часть трубочных тел [Kiselev et al., 2016; Frantsuzova, Danilov, 2016; Danilov et al., 2017].

Опыт наших подобных работ показал, что для условий Алакит-Мархинского поля Якутской алмазоносной провинции эффективным в плане выделения разломов, контролирующих трубки Файнштейновскую (рис. 1, в) и Байтахскую, является применение малоуглубинной электротомографии, радоновой съемки и микросейсмического зондирования [Seminsky et al., 2017]. Таким образом, содержанием исследований, представленных в статье, стала апробация комплекса этих геофизических методов с целью выявления в пределах локального прогнозного участка геологических тел, имеющих трубчатую форму. В качестве локального участка для постановки детальных съемок была выбрана одна из площадок, выделенных на участке «Полигон» в качестве перспективной для обнаружения структур подобного типа (рис. 1, в).

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разломные зоны участка «Полигон», на пересечении которых, согласно прогнозу, может иметь место выбранная для поиска трубчатого тела структурная ловушка, характеризуются мощностью зоны распространения разрывов 2-го порядка ≈ 250 м. Они нарушают платформенный чехол, который представлен терригенно-карбонатными и терригенными породами, относящимися соответственно к нижнему и верхнему палеозою.

Осадочные образования прорваны траппами, основной объем которых в виде долеритовых силлов сосредоточен в горизонтально залегающих породах пермокарбона. Поскольку кимберлитовый магматизм в рассматриваемом районе проявился главным образом в среднем палеозое [Brakhfogel, 1984; Vaganov, 2000], терригенно-карбонатные породы по отношению к трубкам являются вмещающими, а отложения пермокарбона и траппы триаса – перекрывающими.

Радоновая съемка и электротомография были реализованы на площади исследований в пределах 12 параллельных профилей длиной 950 м, заведомо превышающей поперечные размеры пересекающихся зон, и отстоящих друг от друга на 50 м (рис. 2, а). Простираение

профилей (СЗ-ЮВ) – вкрест северо-восточного разлома, так как зоны данной ориентировки вмещают на участке исследований трубчатые тела [Lelyukh et al., 1989]. Таким образом, радоновой съемкой и электротомографией была покрыта площадь размерами $\approx 1000 \times 500$ м. Еще один профиль – ПР00 – был пройден вдоль разломной зоны и имел протяженность 1190 м (рис. 2, а). В его пределах, кроме электротомографии и радоновой съемки, проводились работы по микросейсмическому зондированию осадочного чехла.

Методика измерений и обработки данных электротомографии подробно описана в [Loke, 2000]. При измерениях применялась многоэлектродная электротомографическая станция «Скала-48» [Balkov et al., 2012]. Расстояние между электродами составляло 10 м, а последовательность их подключения соответствовала симметричной четырехточечной установке Шлюмберже, позволяющей зондировать породный массив до глубины 86 м (рис. 2, в, г). Решение обратной задачи и построение геоэлектрических разрезов производились с применением программного обеспечения Res2DInv. Использовался метод робастной инверсии с ограничением значений сопротивлений модели [Loke, 2010]. Ограничение способствует созданию модели с почти постоянными значениями сопротивлений в пределах отдельных областей и контрастными границами между ними, что важно при изучении структур, нарушающих строение осадочного разреза.

Как видно из рис. 2, в, в центральной части всех профилей имеют место области аномально низких удельных электрических сопротивлений ($U\bar{E}C, \rho$), которые могут быть связаны с присутствием, например, кимберлитового тела, как это характерно для подобных геологических образований в различных регионах мира [Arnott, Kostlin, 2003; Abramov, 2008; Saraev et al., 2010; Stogniy, Korotkov, 2010; Mikoiev, 2018]. Если рассматривать Алакит-Мархинское поле [Seminsky et al., 2017], то для вскрытой бурением трубки Байтахской сопротивление кимберлитовых пород по большей части не превышает 100 Ом·м. На отдельных геоэлектрических разрезах, построенных согласно стандартной методике с использованием разных наборов уровней изолиний (рис. 2, в), аномальные области имеют различную форму.

Поскольку для формализованного выделения границ тела и особенностей его внутреннего строения необходим единый набор уровней изолиний, была проанализирована гистограмма распределения величин ρ , измеренных на всем участке исследования (рис. 2, б). В

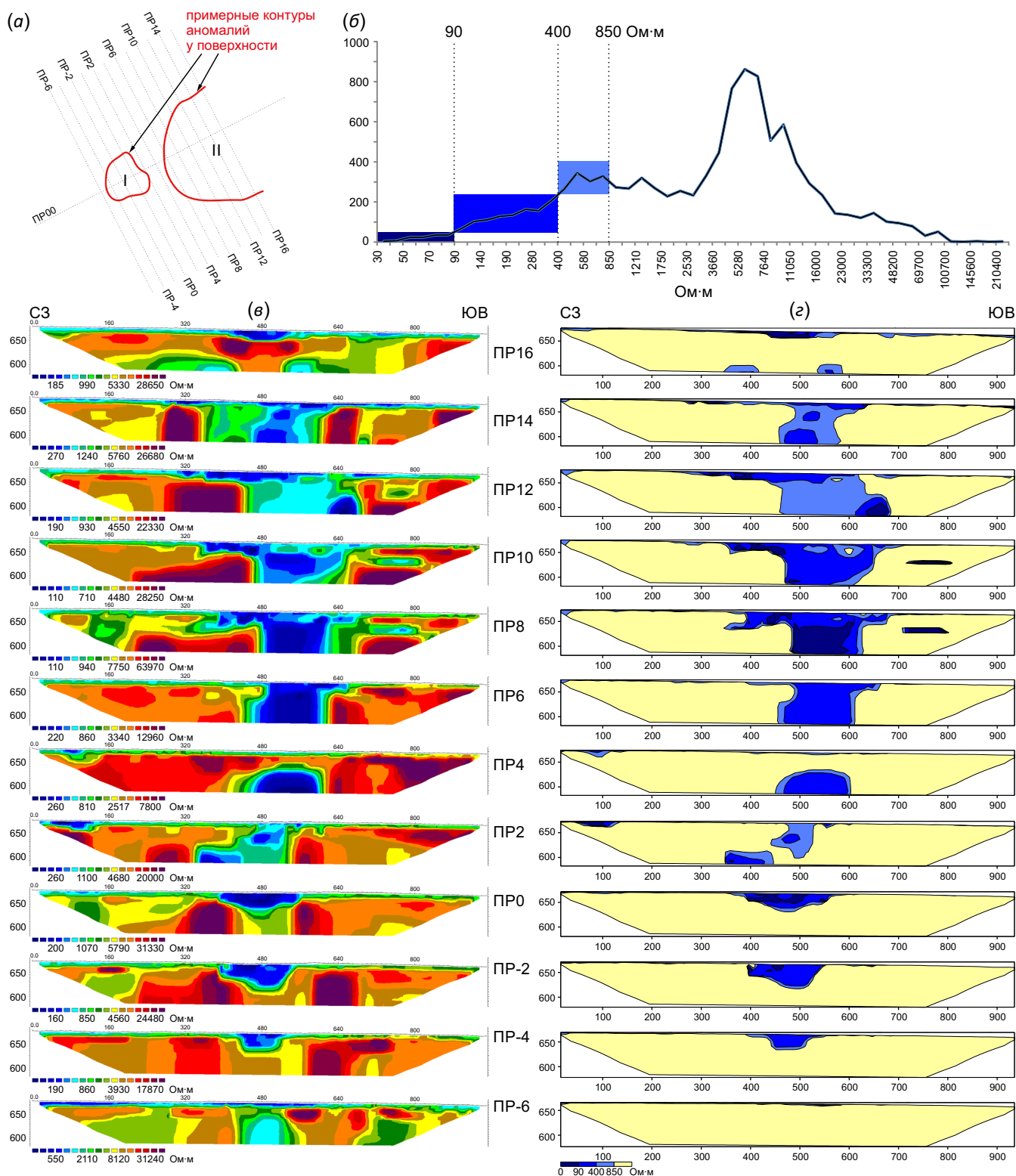


Рис. 2. Результаты электротомографии, реализованной в пределах серии профилей на площади исследований. (а) – схема профилей электротомографии; (б) – гистограмма значений УЭС, измеренных на площади исследований, на которой разными оттенками синего цвета отмечены уровни УЭС, характерные для наиболее нарушенной части породного массива; (в) – геоэлектрические разрезы, построенные при стандартном наборе уровней изолиний УЭС; (г) – геоэлектрические разрезы, построенные с уровнями изолиний 90, 400 и 850 Ом·м, выявленными по гистограмме (б).

Fig. 2. Electrical tomography data from a series of sections in the study area. (а) – schematic map showing positions of electrical tomography profiles; (б) – histogram of resistivity values measured in the study area (shades of blue – resistivity levels typical of the most fractured rocks); (в) – geoelectric sections constructed for a standard set of resistivity isoline levels; (г) – geoelectric sections constructed for the isoline levels of 90, 400 and 850 Ohm·m, identified from the histogram shown in (б).

интересующей нас области низких УЭС отчетливо фиксируются три уровня, границами которых являются значения 90, 400 и 3000 Ом·м, что позволило использовать их в качестве основы для дальнейших построений. Коррекции подверглась последняя величина в сторону уменьшения до значения 850 Ом·м, выбранного в интервале 400–3000 Ом·м как граница первого, считая от оси абсцисс, крупного максимума. Это позволило сделать более строгим определение внешних контуров низкоомного тела, которое на модифицированных таким образом разрезах выделяется достаточно отчетливо (рис. 2, г).

Для построения 3D-модели, позволяющей изучать строение аномалии электропроводности в деталях, был сформирован единый массив данных электротомографии. Применялась авторская программа, в которой использовались координаты двух точек на концах электроразведочных кос для вычисления и присвоения каждому замеру на профиле географических координат. Достаточно густая сеть наблюдений, созданная на площади исследований (10×50 м), обеспечила возможность построения на базе полученного 3D-массива данных как вертикальных (разрезов), так и горизонтальных (карт) сечений выявленной аномалии электропроводности.

Методика эманационной съемки [Bobrov, Cheremnykh, 2014; Seminsky, Demberel, 2013] позволяет определять среднюю за двое суток абсолютную величину объемной активности почвенного радона (Q , Бк/м³) в пункте опробования. Чувствительность использованного для измерений оборудования «Камера-01» находится в диапазоне 0.27 ± 0.03 (Бк·с)⁻¹, а относительная погрешность составляет ± 30 %. Пункты опробования располагались на расстоянии 10 м друг от друга в центральной и 20 м – в краевых частях каждого профиля. Массив измерений, составляющий 359 значений параметра Q , обрабатывался в соответствии с опытом предыдущих эманационных исследований [Seminsky, Bobrov, 2009; Seminsky, Demberel, 2013]. Так, аномальными считались значения Q , превышающие среднее арифметическое (Q_{cp}) величин, измеренных на площади исследований.

Метод микросейсмического зондирования основан на свойстве фундаментальной моды волн Рэлея взаимодействовать с заглубленной неоднородностью земной коры. В окрестности низкоскоростной неоднородности фундаментальная мода волны Рэлея увеличивает свою интенсивность и уменьшает интенсивность в окрестности высокоскоростной неоднородности среды. Несмотря на то, что неоднородность находится на глубине, соответствующие вариации микросейсм могут быть зарегистрированы на поверхности Земли. Метод реализуется при допущении, что вертикальная компонента микросейсмического поля определяется преимущественно вкладом фундаментальной моды волн Рэлея. При этом волны Рэлея в зависимости от длины волны вовлекают в колебательное движение слои от первых метров до десятков километров.

Технология измерений и обработки данных включает последовательные замеры микросейсм одновременно передвигаемой и опорными станциями, расчет распределения интенсивности микросейсм относительно опорной станции по профилю и привязку полученных значений к соответствующей глубине [Gorbatikov et al., 2008].

В основе расчетов по методу спектральных отношений H/V лежит анализ трехкомпонентных записей сейсмического шума, направленный на выявление и оценку его резонансной частоты. Резонансная частота определяется посредством анализа отношения спектров горизонтальных компонент микросейсм к вертикальной:

$$U(f) = (H_x + H_y) / 2H_z,$$

где H_x, H_y – спектры регистрируемых микросейсм по горизонтальным компонентам X и Y, а H_z – спектр по вертикальной компоненте Z.

Пересчет частот в соответствующие глубины производится по формуле [Gorbatikov, Tsukanov, 2011]:

$$H(f) = kVr(f)/f,$$

где $H(f)$ – глубина слоя, для которого строится изображение; $Vr(f)$ – скорость волны Рэлея; f – частота в спектре микросейсмического сигнала; k – численный коэффициент, приблизительно равный 0.4–0.5. На основе полученных спектров строится диаграмма распределения относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля и по глубине, которая отражает наличие аномалий свойств в исследуемой среде.

Микросейсмическое зондирование на площади исследований проводилось с использованием комплекта аппаратуры, состоящего из четырех регистраторов «Байкал 7HR» с пьезоэлектрическими акселерометрами А1638 и велосиметрами СК-1П: частотный диапазон 1–100 Гц, разрядность данных – 24 бит. При проведении измерений аппаратура устанавливалась непосредственно на дневную поверхность и ориентировалась по сторонам света. Один из сейсморегистраторов использовался в качестве опорной точки. Измерения микросейсм производились вдоль профиля ПР00, направленного с северо-востока на юго-запад (рис. 3, а). Шаг между пунктами измерения был равен 25 м. Продолжительность измерений в каждом пункте составляла не менее двух часов. Результатом реализации представленной выше методики зондирования стал двумерный разрез H/V -отношений, позволяющий выделить скоростные неоднородности под выявленными ранее аномалиями электропроводности (рис. 3, в).

Геоморфологические исследования, кроме визуального осмотра места проявления аномалий электропроводности, осуществлялись при помощи мобильного GPS-приемника со встроенным барометром, позволяющим фиксировать изменение высоты с удовлетворительной точностью. Все профили на площади работ увязывались относительно одной точки, откалиброванной по высоте. Для учета влияния изменений атмосферного давления в течение дня вводились временные

поправки. Применение данной методики позволило построить карту рельефа исследуемой площади с достаточно высокой точностью.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Материалы электротомографии были определяющими для выявления в пределах прогнозной площади обособленного геологического тела, занимающего в верхних 86 м разреза секущее положение по отношению к субгоризонтально залегающей осадочной толще (см. рис. 2, в). Особенно отчетливо это проявлено на рис. 2, г, где формализованно выбранные уровни изолиний подчеркивают форму и внутреннее строение рассматриваемого низкоомного тела. Наиболее полно оно представлено на профилях ПР6, ПР8 и ПР10: в центральной части выделяется участок низких УЭС, который у основания разреза имеет ширину 130 м, а у поверхности расширяется по меньшей мере в три раза. Области наиболее низких УЭС находятся внутри тела ($\rho \leq 90$), тяготея к его северо-западной границе.

На смежных более северо-восточных профилях (ПР12 и ПР14) аномалия тоже прослеживается на всю глубину разреза, но имеет более сложную форму и внутреннее строение. На крайнем профиле ПР16 она не выделяется в разрезе как единое тело, хотя на поверхности имеет место плоская линза глубиной 10–15 м, протягивающаяся почти на 0.5 км. Более сложным является строение сечений рассматриваемого тела, полученных на профилях ПР4, ПР2, ПР0, ПР-2, ПР-4 и ПР-6, располагающихся к юго-западу от описанных выше центральных пересечений. Общим является то, что на них аномалия не прослеживается на всю глубину разреза. При этом на крайнем юго-западном профиле ПР-6 она охватывает лишь первые метры от поверхности, т.е. практически отсутствует. На смежных профилях ПР-4, ПР-2 и ПР0 аномалия имеет форму приповерхностной линзы с горизонтальными размерами от 200 до 350 м и глубиной от 30 до 40 м. В то же время аномалии, оконтуренные в пределах двух оставшихся геоэлектрических разрезов (ПР2 и ПР4), несмотря на расположение внутри исследуемой площадки, характеризуются наиболее сложным

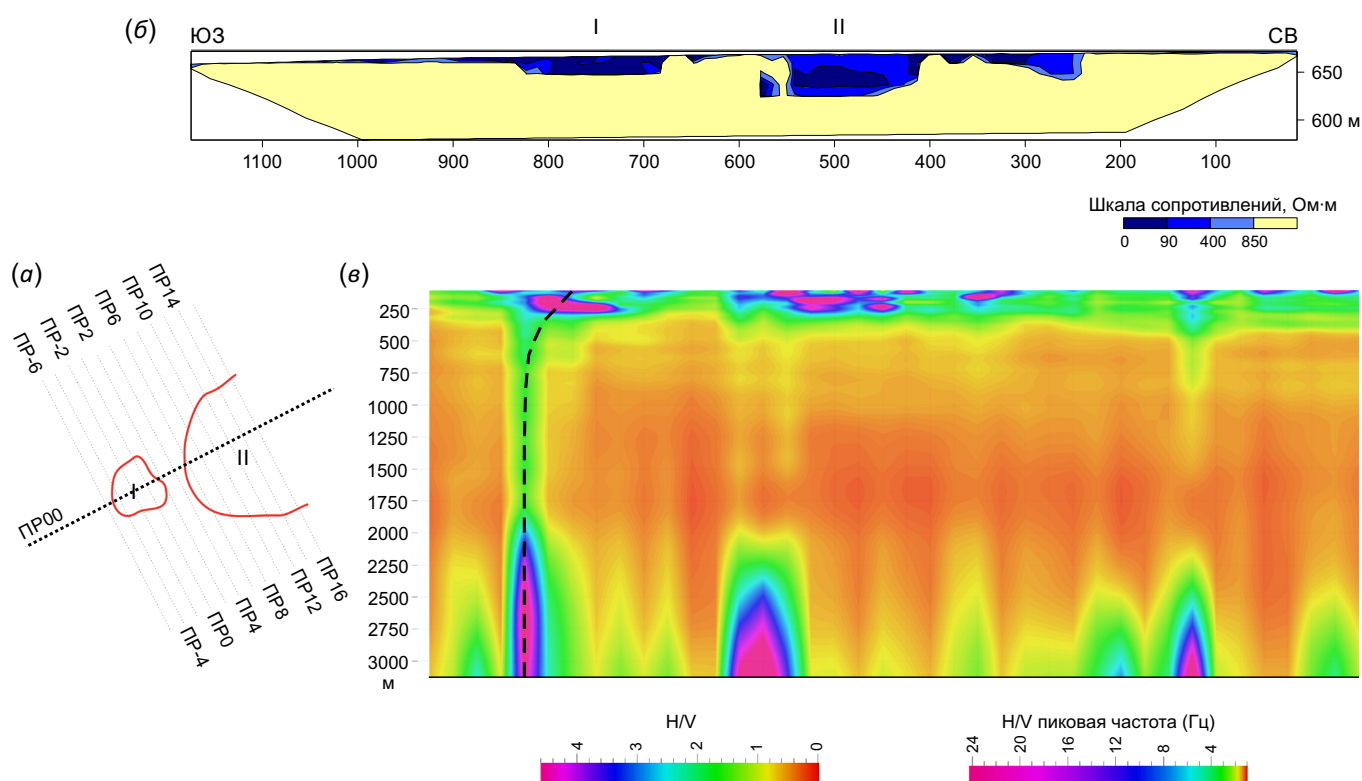


Рис. 3. Результаты электротомографии и микросейсмического зондирования, реализованных на площади исследований в пределах продольного профиля ПР00.

(а) – схема расположения профиля электротомографии (красные контуры – границы аномалий УЭС вблизи поверхности; римские цифры – номера аномалий); (б) – геоэлектрический разрез, построенный для профиля ПР00 по уровням УЭС, выбранным на основе анализа гистограммы рис. 2, б; (в) – двумерный разрез H/V -отношений вдоль профиля ПР00 (пунктир – ось субвертикальной зоны высоких H/V -отношений, располагающейся непосредственно под аномалией I).

Fig. 3. Electrical tomography and microseismic sounding data on the study area within longitudinal profile ПР00.

(а) – schematic map showing the position of the electrical tomography profile (red lines – boundaries of resistivity anomalies near the surface; Roman numerals – numbers of anomalies); (б) – geoelectric section constructed for profile ПР00 with reference to resistivity levels selected on the basis of the analysis of the histogram shown in Fig. 2, б; (в) – 2D section showing H/V ratios along profile ПР00 (dashed line – axis of the subvertical zone of high H/V ratios, which is located directly underneath anomaly I).

внутренним строением. В центральной части профилей имеют место две низкоомных области, одна из которых располагается у поверхности, а другая – у основания разреза, причем они не содержат участков с наиболее низкими УЭС ($\rho \leq 90$).

Трехмерный массив значений УЭС, сформированный для площади исследований по результатам электротомографии, реализованной до глубины 86 м по охарактеризованной выше системе профилей, позволил построить погоризонтные карты распределения параметра ρ (рис. 4).

Несмотря на искажение формы изолиний, вытянутость которых в северо-западном направлении обусловлена большей плотностью замеров в пределах профилей по сравнению с поперечным направлением, на схемах находит объяснение сложный характер распределения низкоомных областей, проявившийся на геоэлектрических разрезах (см. рис. 2, г). Начиная с глубины 7.7 м (где заканчивается влияние низкоомного слоя сезонного оттаивания) отчетливо видно (рис. 4), что в верхней части разреза имеют место две аномальные области – меньшая (I) и примерно в 50–70 м от нее к северо-востоку – большая (II). У поверхности они имеют изометричную, близкую к круглой форму с поперечными

размерами 150 и 500 м, соответственно. С глубиной сначала тело I, а затем и тело II приобретают отчетливую вытянутость и, наконец, после отметки ≈ 35 м переходят в одно тело, простирающееся в северо-восточном направлении. Распределение УЭС внутри тел неравномерное, с тенденцией для близповерхностных срезов (7.7, 13.5 и 19.9 м) к концентрации минимальных значений параметра ρ у северной (для тела I) и западной (для тела II) периферии.

Материалы съемки рельефа мобильным GPS-приемником (рис. 5, а, б) свидетельствуют о том, что площадь исследований характеризуется небольшим разбросом высотных отметок: ≈ 20 м. Генерализованное направление уклона местности – с севера на юг – осложнено небольшими ложбинами. Наиболее заметные из них приурочены к южным частям двух изометричных аномалий УЭС, выделенных при обработке материалов ЭТ.

Материалы радоновой съемки свидетельствуют о низком уровне эманацй радиоактивного газа на площади исследований ($39 \leq Q \leq 1020$ Бк/м³). Это объясняется насыщением в летний период приповерхностной части разреза (сезонно-талого слоя) избыточной влагой, препятствующей выходу газа к поверхности.

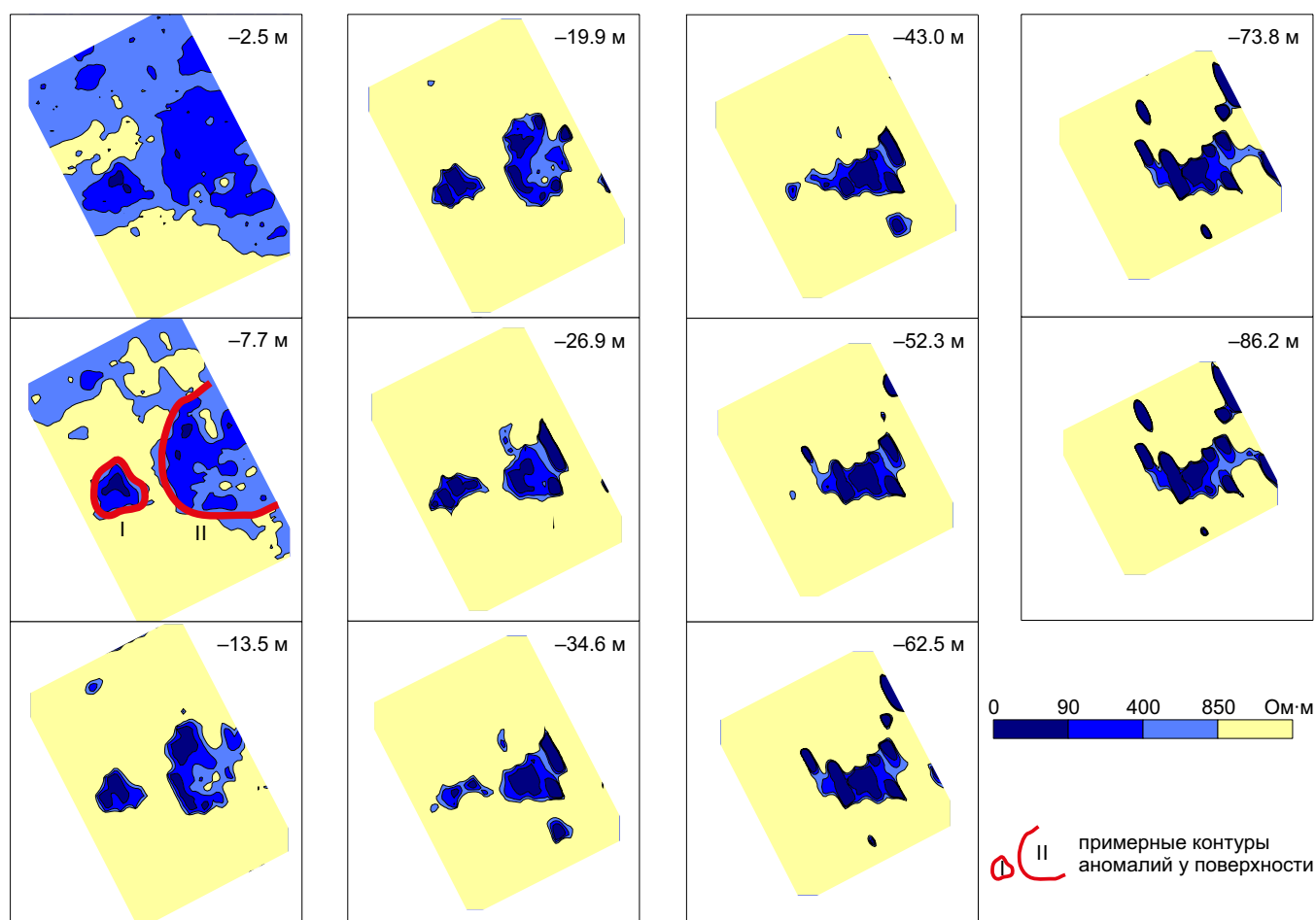


Рис. 4. Погоризонтные карты распределения удельного электрического сопротивления на площади исследования.

Fig. 4. Layer-by-layer maps showing the electrical resistivity patterns in the study area.

Пространственное распределение объемной активности радона отличается неравномерностью, в которой из-за небольшого разброса значений трудно установить явно выраженную закономерность. Однако можно с уверенностью констатировать, что три наиболее крупных по размерам области значений параметра Q , превышающих среднее для всех измерений на изучаемой площади, приурочены к двум низкоомным телам, выявленным у поверхности по данным электротомографии (рис. 5, в). Две из них попадают в контуры этих аномалий, а третья – находится у северной границы тела II.

Материалы микросейсмического зондирования, как и данные рассмотренных выше съемок, обнаруживают совпадение аномалий с положением низкоомных

тел I и II (см. рис. 3, в). Так, высокие значения отношений спектров горизонтальной и вертикальной компонент микросейсм (H/V -отношения) локализуются на продольном профиле ПР00 в верхней части разреза. Видно, что они опускаются до глубины 250 м, т.е. существенно ниже аномалий, выявленных при электротомографии. Под юго-западной частью низкоомной аномалии I на всю глубину разреза трассируется зона (канал?) шириной 50 м и более, в пределах которой H/V -отношения больше, чем значения данного параметра на смежных участках разреза. По-видимому, и под низкоомной аномалией II существует подобная зона, но большей мощности (≈ 100 м). Ее менее отчетливое проявление высокими H/V -отношениями в

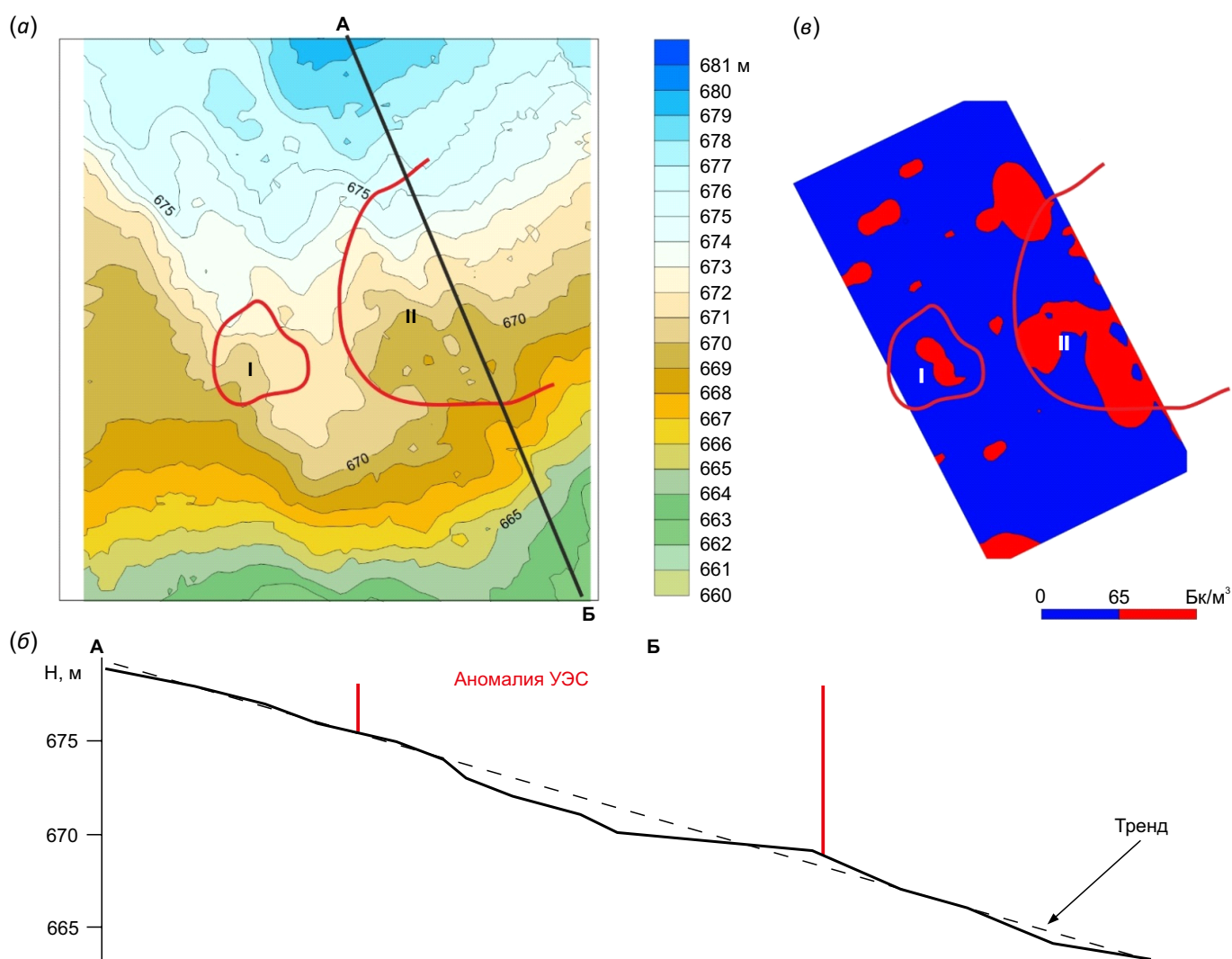


Рис. 5. Проявление аномалии УЭС в рельефе (а-б) и в поле эманаций радона (в).

(а) – схема изолиний рельефа площади исследований и контуры аномалий УЭС (I и II), полученные по данным электротомографии; (б) – геоморфологический профиль по линии А-Б; (в) – схема распределения аномалий объемной активности почвенного радона (красное), уровень которых превышает среднее арифметическое значений, измеренных на участке исследований.

Fig. 5. Electrical resistivity anomaly detected in the relief (a-b) and in the radon field (в).

(а) – isolines of the relief of the study area, and the contours of electrical resistivity anomalies I and II, identified from the electrical tomography data; (б) – geomorphological profile along line A-B; (в) – schematic distribution of anomalies in the volumetric activity of soil radon (red), the levels of which exceed the mean arithmetic values of the measurements taken on site.

средней части разреза (500–2000 м) можно объяснить тем, что профиль ПР00 смещен относительно центра низкоомного тела II, т.е. прошел в краевой части зоны-канала.

Обработка данных электротомографии, радоновой съемки и микросейсмического зондирования, реализованных в пределах участка «Полигон» для заверки одной из прогнозных структурных ловушек, позволила обнаружить в узле пересечения разломов крупную комплексную аномалию, которая характеризуется следующими свойствами: высокой электрической проводимостью, повышенными эманациями радиоактивного газа, высокими соотношениями спектров горизонтальной и вертикальной компонент микросейсм. Каждый из руководящих параметров распределяется в пределах области своих аномальных значений неравномерно, но форма и характер аномалий не противоречат выводу о том, что осадочный разрез в пределах площади исследования содержит геологическое тело трубчатого типа.

Верхняя часть тела (до глубины 80 м) наиболее полно проявляется в поле удельного электрического сопротивления. Материалы электротомографии позволяют в деталях отразить форму трубки после операций 2D- и 3D-инверсий (рис. 6; см. видеоролик для 2D-инверсии). В обоих случаях у поверхности имеют место объекты I и II, характеризующиеся высокой электрической проводимостью. По данным 3D-инверсии они имеют почти круглую форму и постепенно сужаются с глубиной.

2D-инверсия свидетельствует о том, что объекты с глубиной вытягиваются в северо-восточном направлении и, объединяясь друг с другом, переходят на уровне ≈ 40 м в тело дайкообразной формы. В обоих случаях в западной части аномалии II, начиная с обозначенной выше глубины, уходит вниз изометричный канал диаметром ≈ 55 м, выделяющийся наиболее низкими УЭС.

Материалы микросейсмического зондирования позволяют получить представление о строении аномальной области на глубине до 3 км. Здесь высокими соотношениями спектров горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмических волн выделяется одна или две узкие зоны, располагающиеся под юго-западными частями приповерхностных аномалий I и II. Это дает некоторое основание выделять в строении трубки два тела, имеющие отдельные корни в нижней части разреза, соединяющиеся в единую дайку на глубине ≈ 250 м, а затем в 40 м от поверхности вновь разделяющиеся с формированием двух изометричных раструбов. В современном рельефе они отражаются небольшими впадинами, а в почвенном воздухе – повышенной концентрацией радона.

В строении рассматриваемого тела можно увидеть определенные детали (переход с глубиной в дайку, наличие двух-трех корней и др.), имеющие место у некоторых алмазоносных трубок Алакит-Мархинского поля, например Айхал или Сытыканской [Khar'kiv et al., 1998; Nikulin et al., 2001]. Это обусловлено тем, что для них и ряда других трубок характерен контроль

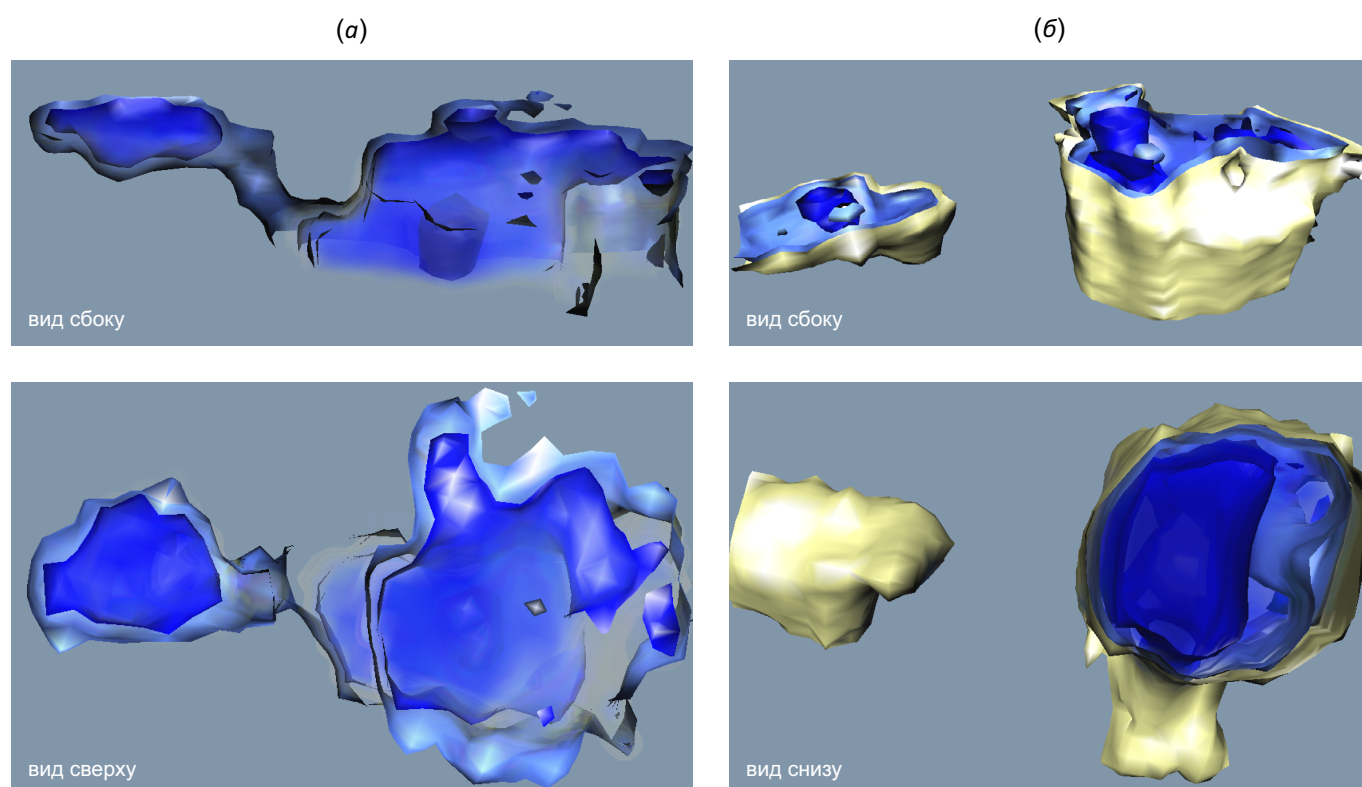
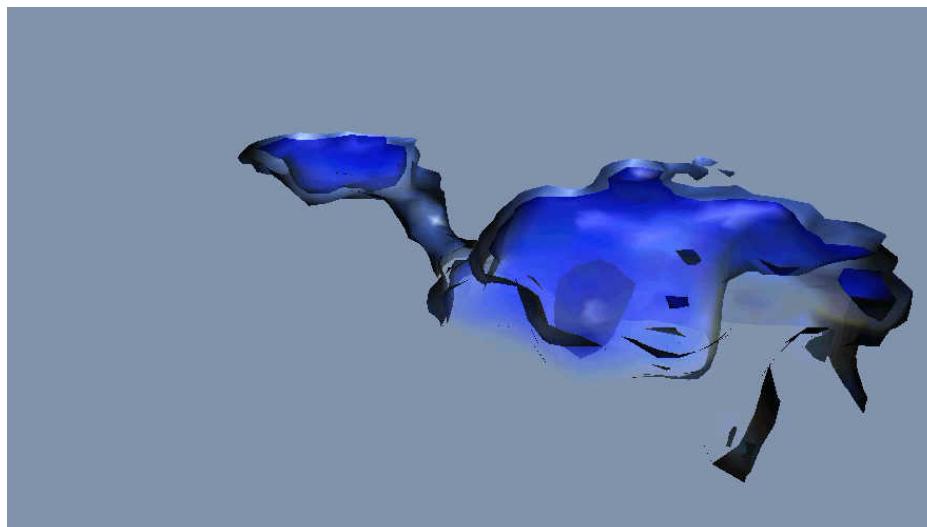


Рис. 6. Форма аномалии УЭС согласно 2D (а) и 3D (б) инверсий данных электротомографии.

Fig. 6. The shape of the electrical resistivity anomaly according to 2D (a) and 3D (b) inversions of the electrical tomography data.



Видео. Модель 2D-инверсии по данным электротомографии.

Video. The 2D inversion model based on electrotomography data.

разломными зонами, которые отличаются вытянутой формой и неоднородным внутренним строением в плане проницаемости для магмы и флюидов.

Итак, интерпретация комплексных материалов позволила установить, что в пределах прогнозной площадки имеет место геологическое тело трубчатой формы. Следует подчеркнуть, что отмеченные в начале данного раздела значения ключевых характеристик изученных геофизических полей (низкие ρ , повышенные значения Q и H/V), а также серия геолого-геофизических признаков (узел пересечения разломов, впадина и др.) могут быть признаками трубки, имеющей как кимберлитовую, так и криптовулканическую природу. В обоих случаях главной особенностью тела, придающей ему установленные физические свойства, является высокая дислоцированность субстрата, которая обусловлена миграцией подвижного агента (магма или флюид) и типом вмещающей структуры (зона разлома). Как следствие, более глубокий сравнительный анализ перечисленных выше и дополнительных признаков вряд ли позволит прийти к однозначному выводу о типе трубчатого тела, что, кроме того, не является задачей данного исследования. Наиболее эффективный способ ее решения – бурение заверочных скважин, т.е. реализация следующего этапа поисковых работ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, апробация комплекса геофизических методов, включающих электротомографию, радоновую съемку и микросейсмическое зондирование, привела к положительному результату – в пределах одной из прогнозных площадок участка «Полигон», относящегося к Алакит-Мархинскому кимберлитовому полю, было выявлено тело трубчатой формы.

Трубка приурочена к узлу пересечения разломов северо-восточного и север-северо-западного простираний и выражена:

1) в материалах электротомографии – областью низких удельных электрических сопротивлений, прослеженной до глубины ≈ 86 м;

2) в поле эманаций радона – прерывистой областью повышенных значений концентрации радиоактивного газа в почве;

3) в материалах микросейсмического зондирования – широкой областью аномальных значений отношений спектров горизонтальной и вертикальной компонент микросейсм, которая начиная с глубины ≈ 500 м переходит в отдельные узкие субвертикальные зоны.

Трубка, отличающаяся по перечисленным свойствам от вмещающих пород, имеет генерализованное северо-восточное простирание и у поверхности проявлена в виде двух изометричных структур I и II, имеющих диаметры ≈ 150 и ≈ 500 м соответственно. По данным электротомографии они образуют на глубине ≈ 40 м одно тело, приобретающее дайкообразную форму. Материалы микросейсмического зондирования подтверждают наличие аномалии в верхней части чехла и показывают, что под ней могут иметь место одна или две нарушенные зоны (канала?) мощностью 50–100 м, которые прослеживаются в глубину на 2 км и более.

Одной из причин отличия физических свойств выделенного тела от вмещающих пород является повышенная дислоцированность его субстрата. В связи с этим на данном уровне исследований обнаруженный геофизическими методами объект должен, несмотря на локализацию в кимберлитовом поле, считаться криптовулканической трубкой, сформированной в результате интенсивного подъема флюидов и газов по ослабленной зоне. Вопрос о наличии кимберлитов в близповерхностной части трубчатого тела может быть, в случае необходимости, решен посредством проходки одной-двух неглубоких скважин.

Таким образом, согласно материалам данной статьи, сочетание электротомографии (ЭТ), радоновой съемки

(РС) и микросейсмического зондирования (МЗ) следует считать эффективным комплексом методов для обнаружения трубчатых тел в пределах Алаakit-Мархинского кимберлитового поля. Положительный результат его применения подтвердил обоснованность представленного в монографии [Seminsky K., Seminsky Zh., 2016] формализованного подхода к выделению перспективных участков (региональный уровень), а затем – структурных ловушек (локальный уровень) в сети разломных зон.

В этом плане описанные ранее прогнозные исследования с последующей постановкой на локальных площадках ЭТ, РС и МЗ представляют единый законченный цикл работ, предвещающих поисковое бурение для регионов, где локализация трубчатых тел контролируется сетью разломных зон. Поскольку эти структуры отличаются крайне неоднородным внутренним строением, задачей дальнейших исследований по проблеме является приобретение опыта реализации работ рекомендуемого цикла в разных регионах и структурных обстановках.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны директору Института земной коры СО РАН, чл.-корр. РАН Д.П. Гладкочубу за неформальную поддержку на всех этапах исследований, сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН к.г.-м.н. А.В. Черемных, к.г.-м.н. А.К. Семинскому и А.С. Черемных за активное участие в полевых исследованиях и обсуждении фактического материала, а также сотрудникам АК «АЛРОСА» (ПАО) – начальнику отдела поисковой геологии М.И. Лелюху и главному специалисту отдела С.А. Прокопьеву, начальнику Ботуобинской ГРЭ В.М. Фомину, начальнику Вилюйской ГРЭ С.С. Хвостик и главному геофизику Вилюйской ГРЭ А.Н. Бондаренко за консультации и действенную помощь в организации полевых работ на разных этапах их проведения. Особую благодарность авторы выражают профессору Иркутского национального исследовательского технического университета Ж.В. Семинскому за ценные советы и замечания, высказанные в ходе интерпретации полученных материалов.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abramov V.Yu., 2008. Petrophysical Characteristics of Geological and Geophysical Models of Kimberlite Bodies of the Arkhangelsk Diamondiferous Province. RUDN Journal of Engineering Researches 1, 70–76 (in Russian) [Абрамов В.Ю. Петрофизические характеристики геолого-геофизических моделей кимберлитовых тел Архангельской алмазоносной провинции // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. 2008. № 1. С. 70–76].

Arnott F., Kostlin E., 2003. Petrophysics of Kimberlites. In: Proceedings of 8th International Kimberlite Conference, Long Abstract. Victoria, Canada.

Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A. et al., 2012. Electric Tomography: Equipment, Methods and Experience of Application. Geophysics 6, 54–63 (in Russian) [Балков Е.В.,

Панин Г.Л., Манштейн Ю.А. и др. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. 2012. № 6. С. 54–63].

Bobrov A.A., Cheremnykh A.S., 2014. Tazheran Intrusive Massif in the Radon Emanation Field (Western Pribaikalie). Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits 2 (45), 64–70 (in Russian) [Бобров А.А., Черемных А.С. Тажеранский интрузивный массив в эманационном радоновом поле (Западное Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 2 (45). С. 64–70].

Bogatikova O.A. (Ed.), 1999. Arkhangelsk Diamondiferous Province (Geology, Petrography, Geochemistry, and Mineralogy). Publishing House of Moscow State University, Moscow, 524 p. (in Russian) [Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия, минералогия) / Ред. О.А. Богатикова. М.: Изд-во МГУ, 1999. 524 с.].

Borsuk A.M., Masurenkov Yu.P., 1964. About Explosive Forms of Intrusive Process. Bulletin of the USSR Academy of Science. Geological Series 4, 38–5 (in Russian) [Борсук А.М., Масуренков Ю.П. Об взрывных формах интрузивного процесса // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1964. № 4. С. 38–55].

Brakhfogel F.F., 1984. Geological Aspects of Kimberlite Magmatism of the Northeastern Areas of the Siberian Platform. Yakutsk Branch of the USSR Acad. Sci., Yakutsk, 128 p. (in Russian) [Брахфогель Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. 128 с.].

Chen Y.-J., Pirajno F., Li N., Guo D.-S., Lai Y., 2009. Isotope Systematics and Fluid Inclusion Studies of the Qiyugou Breccia Pipe-Hosted Gold Deposit, Qinling Orogen, Henan Province, China: Implications for Ore Genesis. Ore Geology Reviews 35 (2), 245–261. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.11.003>.

Corbett G.J., Leach T.M., 1996. Southwest Pacific Rim Gold – Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization. Workshop manual. 215 p.

Crockett R.N., Mason R., 1968. Foci of Mantle Disturbance in Southern Africa and Their Economic Significance. Economic Geology 63 (5), 532–540. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.63.5.532>.

Cunio E., 2009. Comparison of Ground TEM and VTEM Responses over Kimberlites in the Kalahari of Botswana. Exploration Geophysics 40 (4), 308–319. <https://doi.org/10.1071/EG09019>.

Danilov K.B., Afonin N.Yu., Koshkin A.I., 2017. The Structure of the Pionerskaya Pipe of the Arkhangelsk Diamondiferous Province According to the Complex of Passive Seismic Methods. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences 2 (34), 90–98 (in Russian) [Данилов К.Б., Афонин Н.Ю., Кошкин А.И. Строение трубки «Пионерская» Архангельской алмазоносной провинции по данным комплекса пассивных

сейсмических методов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 2 (34). С. 90–98].

Emmons W.H., 1938. Diatremes and Certain Ore-Bearing Pipes. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Technical Publication 891, 1–15.

Endogenous Ore-Bearing Breccia Formations, 2018. Guidelines for Identifying Endogenous Breccia Formations of Various Genetic Types and Assessing Their Ore-Bearing Potential in Relation to the Gosgeolkart Tasks. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 104 p. (in Russian) [Эндогенные рудоносные брекчиевые образования: Методические рекомендации по выявлению эндогенных брекчиевых образований различных генетических типов и оценке их потенциальной рудоносности применительно к задачам Госгеолкарта. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2018. 104 с.].

Evstratov A.A., 2015. Basite Volcanic Structures of the North-Eastern Areas of the Tunguska Syncline (To the Problem of Studying Diamondiferous «Closed» Areas). Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 23 p. (in Russian) [Евстратов А.А. Базитовые вулканоструктуры северо-востока Тунгусской синеклизы (в связи с проблемой изучения алмазоносных «закрытых» территорий): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2015. 23 с.].

Fon der Flaass G.S., Nikulin V.I., 2000. Atlas of Ore Field Structures of Iron Ore Deposits. Publishing House of Irkutsk State University, Irkutsk, 192 p. (in Russian) [Фон дер Флаасс Г.С., Никулин В.И. Атлас структур рудных полей железорудных месторождений. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2000. 192 с.].

Frantsuzova V.I., Danilov K.B., 2016. The Structure of the Lomonosov Explosion Tube in the Arkhangelsk Diamondiferous Province According to the Microseismic Field Anomalies. *Volcanology and Seismology* 10 (5), 339–346 (in Russian) [Французова В.И., Данилов К.Б. Структура трубки взрыва имени М.В. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции по аномалиям микросейсмического поля // Вулканология и сейсмология. 2016. Т. 10. № 5. С. 339–346]. <https://doi.org/10.7868/S0203030616050023>.

Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A., 2008. Tectonophysical Studies for Diamond Prospecting. Guidelines. Nauchny Mir, Moscow, 175 p. (in Russian) [Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисковых работах: Методическое пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с.].

Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E., 2008. Patterns of Microseismic Field Formation under the Influence of Local Geological Heterogeneities, and Sounding Using Microseisms. *Physics of the Earth* 7, 66–84 (in Russian) [Горбати́ков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84].

Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A., 2011. Modeling of Rayleigh Waves near Scattering Velocity Inhomogeneities. Study of the

possibilities of the microseismic sounding method. *Physics of the Earth* 4, 96–112 (in Russian) [Горбати́ков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112]. <https://doi.org/10.1134/S0002333711040077>.

Guha A., Rani K., Varma C.B., Sarwate N.K., Sharma N., Mukherjee A., Kumar K.V., Pal S.K., Saw A.K., Jha S.K., 2018. Identification of Potential Zones for Kimberlite Exploration – an Earth Observation Approach. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-5, 239–250. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-239-2018>.

Gurney J.J., Helmstaedt H.H., le Roex A.P. Nowicki T.E., Richardson S.H., Westerlund K.J., 2005. Diamonds: Crustal Distribution and Formation Processes in Time and Space and an Integrated Deposit Model. *Economic Geology* 100th Anniversary Vol., 143–178. <https://doi.org/10.5382/AV100.07>.

Ignatov P.A., Bolonin A.V., Vasiliev I.D. et al., 2009. Contacts of the Arkhangelsk Kimberlite Pipe and Deformations of Host and Cover Rocks. *Geology and Exploration* 5, 28–34 (in Russian) [Игнатов П.А., Болонин А.В., Васильев И.Д. и др. Контакты кимберлитовой трубки Архангельская и деформации вмещающих и перекрывающих пород // Геология и разведка. 2009. № 5. С. 28–34].

Ignatov P.A., Bushkov K.Yu., Novikov K.V., Tolstov A.V., 2010. The Basite Breccia Area of the Nakyn Kimberlite Field. *Bulletin of Universities. Geology and Exploration* 2, 31–35 (in Russian) [Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Новиков К.В., Толстов А.В. Ареал брекчий базитов Накынского кимберлитового поля // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2010. № 2. С. 31–35].

Jelsma H., Barnett W., Richards S., Lister G., 2009. Tectonic Setting of Kimberlites. *Lithos* 112 (S1), 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.030>.

Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I., 1998. Indigenous Diamonds Deposits of the World. Nedra, Moscow, 554 p. (in Russian) [Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 554 с.].

Kiselev G.P., Danilov K.B., Yakovlev E.Yu., Druzhinin S.V., 2016. Radiometric and Seismometric Studies of the Chidvinskaya Kimberlite Pipe (Arkhangelsk Diamondiferous Province). *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* 2 (30), 43–53 (in Russian) [Киселев Г.П., Данилов К.Б., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В. Радиометрические и сейсмометрические исследования кимберлитовой трубки Чидвинская (Архангельская алмазоносная провинция) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 2 (30). С. 43–53].

Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N., 2009. «Potassium» Basalts and «Picritobasalts» of the Devonian Kimberlite Fields in Western Yakutia and Their Relationship with Kimberlite Magmatism (Russia). *Geology of Ore Deposits* 51 (1), 38–57 (in Russian) [Киселев А.И., Ярмолук В.В., Егоров К.Н. «Калиевые» базальты и «пикритобазальты» девонских кимберлитовых полей Западной Якутии и их

связь с кимберлитовым магматизмом (Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 1. С. 38–57]. <https://doi.org/10.1134/S1075701509010036>.

Kjarsgaard B.A., 2007. Kimberlite Pipe Models: Significance for Exploration. In: Exploration 07. Proceedings of Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration (September 9–12, 2007). Toronto, p. 667–677.

Kurszlaukis S., Barnett W., 2003. Volcanological and Structural Aspects of the Venetia Kimberlite Cluster – a Case Study of South African Kimberlite Maar-Diatreme Volcanoes. South African Journal of Geology 106, 145–172.

Lelyukh M.I., Kryuchkov L.I., Ustinov V.I., 1989. About Patterns of Spatial Distribution of Kimberlites in the Aikhal Region. In: Problems of Kimberlite Magmatism. Nauka, Novosibirsk, 66–71 (in Russian) [Лелюх М.И., Крючков Л.И., Устинов В.И. О закономерностях пространственного размещения кимберлитов в Айхальском районе // Проблемы кимберлитового магматизма. Новосибирск: Наука, 1989. С. 66–71].

Loke M.H., 2000. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys. Available from: <https://pages.mtu.edu/~ctyoung/LOKENOTE.PDF> (last accessed 22.12.2015).

Loke M.H., 2010. Tutorial: RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia: Geotomo Software, 148 p.

Macnae J.C., 1979. Kimberlites and Exploration Geophysics. Geophysics 44 (8), 1395–1416. <https://doi.org/10.1190/1.1441014>.

Mikoev I.I., 2018. About Patterns of Spatial Distribution of Kimberlites in the Aikhal Region. Ores and Metals 3, 40–46 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10005>.

Milashv V.A., 1984. Explosion Pipes. Nedra, Leningrad, 268 p. (in Russian) [Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.].

Nikulin V.I., Lelyukh M.I., Fon der Flaas G.S., 2001. Diamond Diagnostics. Guidelines. Glazkovskaya Tipografija, Irkutsk, 320 p. (in Russian) [Никулин В.И., Лелюх М.И., фон дер Флаас Г.С. Алмазпрогностика: Методическое пособие. Иркутск: Глазковская типография, 2001. 320 с.].

Ramadass G., Subhashbabu A., Laxmi G.U., 2015. Structural Analysis of Airborne Radiometric Data for Identification of Kimberlites in Parts of Eastern Dharwar Craton. International Journal of Science and Research 4 (4), 2375–2380.

Rosen O.M., Manakov A.V., Zinchuk N.N., 2006. Siberian Craton: Formation, and Diamond Potential. Nauchny Mir, Moscow, 210 p. (in Russian) [Розен О.М., Манакон А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазность. М.: Научный мир, 2006. 210 с.].

Saraev A.K., Antashchuk K.M., Nikiforov A.B., Prokofiev O.M., Romanova N.E., Denisov R.V., 2010. Possibilities of Audiomagnetotelluric Sounding for Solving Structural and Prospecting Problems in Diamondiferous Regions. Issues of Geophysicists 43, 126–158 (in Russian) [Сараев А.К.,

Антащук К.М., Никифоров А.Б., Прокофьев О.М., Романова Н.Е., Денисов Р.В. Возможности аудиоманнитотеллурических зондирований при решении структурных и поисковых задач в алмазоносных районах // Вопросы геофизики. 2010. Вып. 43. С. 126–158].

Seminsky K.Zh., 2003. Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. Publishing House of SB RAS, "Geo" Branch, Novosibirsk, 244 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 244 с.].

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2009. Radon Activity of Crustal Faults Differing in Types (Cases of the Western Pribaikalie and Southern Priangarie). Geology and Geophysics 50 (8), 881–896 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бобров А.А. Радоновая активность разнотипных разломов земной коры (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 881–896].

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., 2017. Electric Tomography and Radon Imaging of Kimberlite-Bearing Fault Zones of the Alakit-Markha Field in Western Yakutia: Experience of Application. Earth Cryosphere XXI (3), 3–12 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бобров А.А., Оленченко В.В. Электротомография и радоновая съемка кимберлитовых разломных зон Алакит-Мархинского поля в Западной Якутии: опыт применения // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 3. С. 3–12]. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-3\(3-12\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-3(3-12)).

Seminsky K.Zh., Demberel S., 2013. The First Estimations of Soil Radon Activity near Faults in Central Mongolia. Radiation Measurements 49, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.12.013>.

Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016. Special Mapping of Crustal Fault Zones and Its Capabilities for the Study of Structural Control of Kimberlites in the Alakit-Markha Field of the Yakutian Diamondiferous Province. Publishing House of Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 204 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алакит-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.]. <http://crust.irk.ru/art/2016speccart.pdf>.

Serokurov E.N., Kalmykov V.D., Zuev V.M., 2001. Space Methods for Forecasting and Prospecting for Diamond Deposits. Nedra, Moscow, 198 p. (in Russian) [Серокуров Е.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М. Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов. М.: Недра, 2001. 198 с.].

Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Fields of Dynamic Influence of Faults (Modeling Results). Nauka, Novosibirsk, 112 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.].

Skewes M.A., Stern C.R., 1994. Tectonic Trigger for the Formation of Late Miocene Cu-Rich Breccia Pipes in the

Andes of Central Chile. *Geology* 22, 551–554. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022%3C0551:TTFTFO%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022%3C0551:TTFTFO%3E2.3.CO;2).

Stogniy Vas.V., Korotkov Yu.V., 2010. Search for Kimberlite Bodies by Transient Process Method. Nauka, Novosibirsk, 121 p. (in Russian) [Стогний Вас.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Наука, 2010. 121 с.].

Tugovik G.I., 1984. Fluid Explosive Structures and Their Ore Potential. Nauka, Moscow, 193 p. (in Russian) [Туговик Г.И. Флюидно-взрывные структуры и их рудоносность. М.: Наука, 1984. 193 с.].

Ukhanov A.V., Sobornov O.P., Khar'kiv A.D., Smirnov G.I., 1982. The Thorium and Uranium Contents in Kimberlites of Siberia and Africa According to the Results of New Gamma-Spectrometric Determinations. *Geochemistry* 8, 1204–1210 (in Russian) [Уханов А.В., Соборнов О.П., Харьков А.Д., Смирнов Г.И. Содержание тория и урана в кимберлитах Сибири и Африки по результатам новых гамма-спектрометрических определений // Геохимия. 1982. № 8. С. 1204–1210].

Vaganov V.I., 2000. Diamond Deposits of Russia and the World (Basics of Forecasting). Geoinformmark CJSC, Moscow, 371 p. (in Russian) [Ваганов В.И. Алмазные месторождения

России и мира (Основы прогнозирования). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. 371 с.].

Viezzoli A., Kaminski V., 2016. Airborne IP: Examples from the Mount Milligan Deposit, Canada and the Amakinskaya Kimberlite Pipe, Russia. *Exploration Geophysics* 47 (4), 269–278. <https://doi.org/10.1071/EG16015>.

Vogelman N.A., 1998. Ore-Bearing Explosion-Injection Breccias of Subsurface Gold Ore Deposits. *Domestic Geology* 3, 50–55 (in Russian) [Фогельман Н.А. Рудоносные взрывно-инъекционные брекчии близповерхностных золоторудных месторождений // Отечественная геология. 1998. № 3. С. 50–55].

Warnaars F.W., 1985. Holmgren C., Barassi S. Porphyry Copper and Tourmaline Breccias at Los Bronces – Rio Blanco, Chile. *Economic Geology* 80 (6), 1544–1565. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.6.1544>.

White S.H., de Boorder H., Smith C.B., 1995. Structural Controls of Kimberlite and Lamproite Emplacement. *Journal of Geochemical Exploration* 53 (1–3), 245–264. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00033-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00033-8).

Yakubchuk A., 2009. Diamond Deposits of the Siberian Craton: Products of Post –1200 Ma Plume Events Affecting the Lithospheric Keel. *Ore Geology Reviews* 35 (2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.10.002>.

KONSTANTIN ZH. SEMINSKY

Doctor of Geology and Mineralogy, Deputy Director
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: seminsky@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0001-7607-0417

SERGEY A. BORNYAKOV

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: bornyak@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0002-5119-1092

ALEXANDR A. BOBROV

Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: alexbob@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0002-4405-6132

ARTEM N. SHAGUN

Lead Engineer
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: shagun@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0002-3906-2650

КОНСТАНТИН ЖАНОВИЧ СЕМИНСКИЙ

докт. геол.-мин. наук, зам. директора
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОРНЯКОВ

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ БОБРОВ

канд. геол.-мин. наук, н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АРТЕМ НИКОЛАЕВИЧ ШАГУН

вед. инженер
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия