

**TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS AND SELF-POTENTIAL SURVEYS
IN THE OLKHON REGION: RESULTS AND GEOLOGICAL INTERPRETATION PROBLEMS****N.O. Kozhevnikov¹✉, Yu.A. Agafonov², D.S. Polishchuk²**

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² SIGMA-GEO LLC, 6 Zvezdinskaya St, Irkutsk 664039, Russia

ABSTRACT. Priolkhonye, as part of the Olkhon region, is a unique geological testing ground where the structures of the basement parts of the Siberian craton and the Central Asian Foldbelt are exposed on the modern erosional surface. The understanding of the structure of this region primarily comes from the ground-based geological mapping and remote sensing results. However, the applicability of remote sensing technologies in the study of the Priolkhonye region structure is limited, especially in depth extrapolation of the results. Therefore, it is essential to use geophysical methods that enable three-dimensional geological mapping. This article presents and discusses the results of studying the regional geological structure of Priolkhonye using transient (time-domain) electromagnetic sounding and self-potential methods. These studies have revealed for the first time the features of the regional-scale structure of Priolkhonye that do not come to light during the ground-based geological survey. An important result of the studies is that they yield questions concerning the geological interpretation of the geophysical data, which cannot yet be answered unambiguously under the current concept of the geological structure of Priolkhonye.

KEYWORDS: Priolkhonye; time-domain electromagnetic sounding method; self-potential method; geoelectric model; shear zones; graphite

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS (project No. FWZZ-2022-0024).

**RESEARCH ARTICLE****Correspondence:** Nikolay O. Kozhevnikov, kozhevnikovo@ipgg.sbras.ru

EDN: FEXQJ

Received: June 8, 2025

Revised: September 29, 2025

Accepted: October 14, 2025

FOR CITATION: Kozhevnikov N.O., Agafonov Yu.A., Polishchuk D.S., 2025. Time-Domain Electromagnetic Soundings and Self-Potential Surveys in the Olkhon Region: Results and Geological Interpretation Problems. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (6), 0868. doi: 10.5800/GT-2025-16-6-0868

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРИОЛЬХОНЬЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Н.О. Кожевников¹, Ю.А. Агафонов², Д.С. Полищук²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² ООО «СИГМА-ГЕО», 664039, Иркутск, ул. Звездинская, 6, Россия

АННОТАЦИЯ. Приольхонье, как часть Ольхонского региона, является уникальным геологическим полигоном, где на современном эрозионном срезе наблюдаются выходы структур фундамента Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса. Представления о структуре этого региона основываются преимущественно на результатах наземного геологического картирования и дистанционных съемок. Однако при изучении структуры Приольхонья возможности таких съемок, особенно при экстраполяции их результатов на глубину, ограничены. В связи с этим актуально привлечение геофизических методов, позволяющих осуществлять объемное геологическое картирование. В статье приводятся и обсуждаются результаты изучения регионального геологического строения Приольхонья с помощью зондирований становлением электромагнитного поля и методом естественного электрического поля. Благодаря этим исследованиям впервые выделены элементы региональной структуры Приольхонья, которые не проявляются в результатах наземных геологических съемок. Важным результатом исследований являются возникающие при геологической интерпретации геофизических данных вопросы, на которые пока нет однозначных ответов в рамках современной концепции геологического строения Приольхонья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Приольхонье; зондирование становлением электромагнитного поля; естественное электрическое поле; геоэлектрическая модель; зоны сдвига; графит

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания ИНГГ СО РАН (проект № FWZZ-2022-0024).

1. ВВЕДЕНИЕ

Приольхонье, как часть Ольхонского региона, относится к области краевых поднятий Саяно-Байкальского складчатого пояса. На северо-западе территории Приольхонья ограничивается Приморским разломом, на юго-востоке – береговой линией оз. Байкал. Разлом круто погружается на юго-восток и в рельфе выражен в форме денудационно-тектонического уступа высотой до 200 м. Пространственно Приморский разлом совпадает с раннепалеозойским коллизионным швом, или сутурой [Fedorovsky, Sklyarov, 2010]. Согласно современным представлениям, Приольхонье является частью раннепалеозойской коллизионной системы, сформированной в результате причленения к Сибирскому кратону Ольхонского террейна [Fedorovsky et al., 1995]. На геологической карте Приольхонья [Fedorovsky, Sklyarov, 2010] отчетливо проявлено полосовое строение этой территории. Полосы террейна образованы тектоническими пластинами сдвигового типа, разделенными бластомилонитами. Пластины сложены метаморфическими породами разных фаций метаморфизма – от эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой на юге Приольхонья до амфиболитовой в центральной части и до гранулитовой на северо-западе. Первичные осадочные и вулканогенные породы Приольхонья подверглись значительным изменениям под воздействием глубинных процессов. Наиболее ранним из них был региональный метаморфизм гранулитовой и амфиболитовой фаций, сопровождавшийся интенсивным

складкообразованием. Позднее проявились процессы ультраметаморфизма и графитизации. На этом этапе произошли интенсивные тектонические подвижки, проявившиеся в виде наложенной складчатости и зон пластического течения в мраморах с образованием мраморного меланжа и зон будинажа, а также в образовании серии крупных разломов. Почти повсеместно метаморфические породы Приольхонья характеризуются крутыми углами падения слоистости.

Как известно, Приольхонье является одним из опорных геологических полигонов Восточной Сибири [Fedorovsky, Sklyarov, 2010]. Однако до сих пор представления о структуре этого региона основываются преимущественно на результатах наземного геологического картирования, дистанционных съемок, использования геохимических методов и определений абсолютного возраста. Однако при изучении структуры Приольхонья возможности таких съемок, особенно при экстраполяции их результатов на глубину, ограничены. В связи с этим привлекают внимание геофизические методы, позволяющие осуществлять объемное геологическое картирование.

В 1979–2001 гг. проводились съемки методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), электропрофилирования, естественного электрического поля (ЕП), сверхдлинноволнового электропрофилирования (СДВР) и зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне (ЗСБ). Основной объем исследований выполнен методами ЗСБ и ЕП.

Эти работы позволили получить первое представление о геоэлектрическом строении Приольхонья до глубины порядка нескольких сотен метров [Kozhevnikov et al., 2004].

Согласно результатам этих исследований, в региональном плане Приольхонье включает северо-западный и юго-восточный блоки, граница между которыми проходит по Кучулгинскому разлому (рис. 1). Северо-западный блок представлен Чернорудской зоной, или Чернорудско-Баракчинской [Letnikov et al., 1997; Savelyeva, 1998], тектонической зоной (ЧБТЗ). Она образована породами, относящимися к гранулитовой фации метаморфизма, и представлена узкой (до 5 км) и протяженной (более 50 км) структурой северо-восточного простирания, прослеживающейся в северо-западной части Приольхонья в метаморфическом комплексе ольхонской серии, рядом с границей краевого выступа фундамента Сибирской платформы. В работах [Letnikov et al., 1997; Savelyeva, 1998] она описана как пример линейных зон глубинных разломов с проявлением парагенезисов, формировавшихся в восстановительных условиях. Время протекания эндогенных процессов (включая региональный метаморфизм) авторами указанных статей относится к периоду 500–

350 млн лет назад. За пределами ЧБТЗ упомянутые признаки глубинной тектонической зоны отсутствуют. На уровне современного эрозионного среза Чернорудская зона располагается в пределах неотектонической структуры, известной как Чернорудский (Бугульдейско-Чернорудский) грабен, или Мухор-Таловский блок [Smolyansky, Gonchar, 2001]. Он представляет собой грабенообразный прогиб, протягивающийся вдоль Приморского разлома от р. Бугульдейка до залива Мухор и далее в Малое Море.

По данным исследований методом ЗСБ здесь обнаружены породы с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) от единиц до первых десятков Ом·м, кровля которых залегает субгоризонтально на глубине от 100 до 400 м. Зона отмечается отрицательными аномалиями ЕП амплитудой до 500 мВ. Юго-восточный блок включает широкую полосу пород между Кучулгинским разломом и побережьем оз. Байкал. По сравнению с Чернорудской зоной этот блок характеризуется более однородным геоэлектрическим строением. Здесь нет аномалий ЕП большой амплитуды, а проводники с пологим залеганием кровли, подобные выделенным в Чернорудской зоне, в пределах юго-восточного блока при работах 1980–2001 гг. не обнаружены.

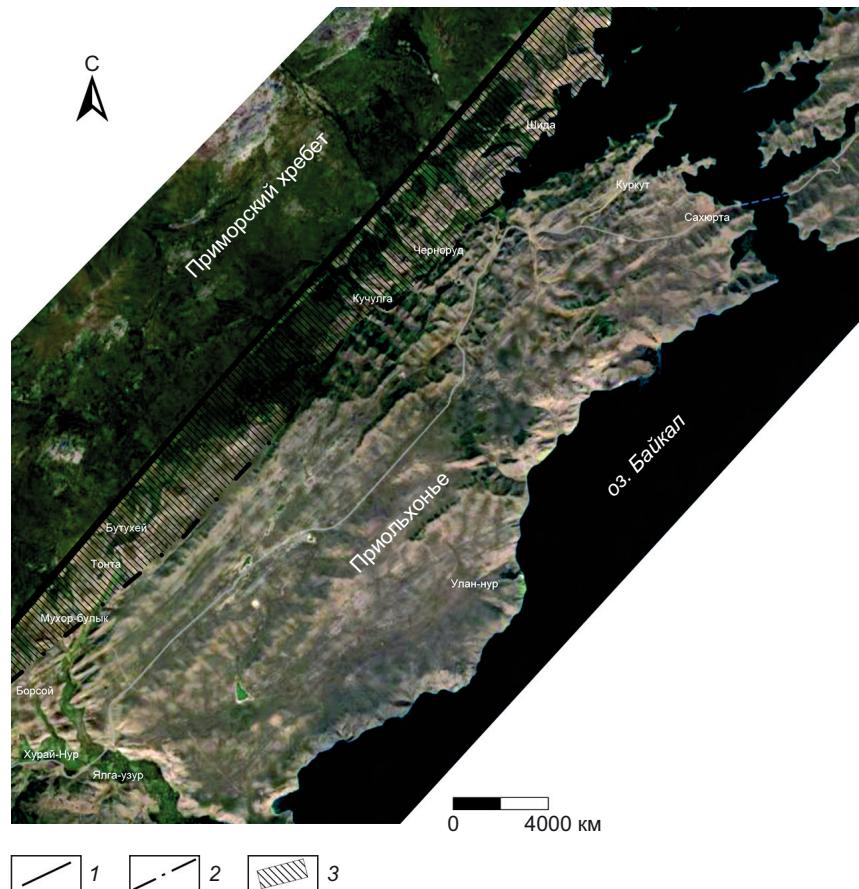


Рис. 1. Основные элементы региональной структуры района исследований: 1 – Приморский разлом; 2 – Кучулгинский разлом; 3 – Чернорудская зона и Бугульдейско-Чернорудский грабен.

Fig. 1. Main regional structural features of the study area: 1 – Primorsky fault; 2 – Kuchulga fault; 3 – Chernorud zone and Buguldeika-Chernorud graben.

В 1980–2001 гг. для съемок методом ЗСБ использовалась симметричная установка «петля в петле» с генераторной петлей размером 200×200 м и приемной петлей размером 50×50 м. Ток в генераторной петле составлял единицы ампер; глубина зондирований при этом не превышала 300–400 м. Возможно, за счет использования генераторных петель с большим моментом субгоризонтальные проводящие структуры могли быть обнаружены и в пределах юго-восточного блока [Kozhevnikov et al., 2004].

В 2004–2010 и 2015 гг. для возбуждения индукционных переходных процессов применялись генераторные петли (Tx) размером 400×400 и 500×500 м, ток в которых при измерении на поздних временах достигал 100–150 А. В сочетании с многоканальными телеметрическими измерительными модулями SGS TEM и FastSnap [Pospeev et al., 2018] это, по сравнению с работами более раннего этапа, позволило улучшить качество данных ЗСБ и в несколько раз (иногда на порядок) увеличить глубину зондирований.

Результаты этих исследований публиковались в кратком изложении по мере их получения. В настоящей статье они представлены в развернутом виде. Кроме этого, в ней описываются аномалии естественного электрического поля, которые наблюдаются в Чернорудской зоне, и обсуждается их возможная природа. По сравнению с предшествующими публикациями, настоящая статья дает более полное представление о геоэлектрической модели Приольхонья; кроме того, в ней обозначены некоторые дискуссионные моменты, касающиеся геологического строения этого района Западного Прибайкалья.

2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ МЕТОДОМ ЗСБ

Зондирования становлением электромагнитного поля с большими генераторными петлями выполнялись многоразовыми установками по методике, применяемой при поисках углеводородов на Сибирской платформе [Pospeev et al., 2018]. При неизменном положении генераторной петли измерения выполнялись с приемной петлей, расположенной в центре генераторной (соосная установка, или Qq), и четырьмя приемными петлями, вынесенными за ее пределы (разнесенные установки, или Q-q). Измерения с многоразовыми установками позволяют диагностировать отклонения модели геологической среды от горизонтально-слоистой и/или проявления азимутальной анизотропии. Кроме этого, они дают возможность идентифицировать эффекты индукционно-вызванной электрической поляризации и магнитной вязкости.

Для регистрации переходных процессов использовались цифровые многоканальные регистраторы, основу которых составляет 24-разрядные прецизионные аналого-цифровые преобразователи. Вследствие малого времени дискретизации запись переходного процесса состоит из большого количества отсчетов. Благодаря высокой временной плотности записи и большому

числу индивидуальных переходных процессов, которые записываются в единую последовательность отсчетов в течение времени, равного многим периодам повторения импульсов тока в генераторной петле, формируется длинный временной ряд отсчетов. Он сохраняется в виде файла и содержит информацию не только о полезном сигнале, но и о помехах. В дальнейшем этот числовая ряд обрабатывается с помощью процедур фильтрации, основной из которых является накопление (усреднение по временными интервалам, или «окнам») смеси полезного сигнала и помехи. Периодические помехи, например промышленной частоты, выделяются с помощью Фурье-анализа и затем вычитаются из смеси сигнала и помехи.

На рис. 2 приведен космоснимок района исследований, на котором отмечены точки, показывающие положение центров генераторных петель. В этих же точках располагались центры приемных петель для симметричных (соосных) установок «петля в петле». Чтобы не перегружать карту, а также в связи с тем, что при интерпретации использовались преимущественно данные симметричных установок, центры приемных петель, расположенных снаружи генераторных, не показаны. Первая цифра возле каждого пункта зондирования указывает год съемки, вторая – номер генераторной петли. Например, 4–5 означает, что измерения проводились в 2004 г. с генераторной петлей № 5. Всего в 2004–2010 гг. выполнено более 40 зондирований установками Qq с большими генераторными петлями.

Кривые кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_t для установок Qq приведены на рис. 3. Кривые объединены в группы в соответствии с годом, когда проводились измерения. Как можно видеть, наблюдаются отличия индивидуальных кривых ρ_t в пределах каждой группы, а также между группами в целом. Это указывает на неоднородное геоэлектрическое строение исследуемого участка земной коры и ограниченные возможности интерпретации данных ЗСБ на основе модели горизонтально-слоистой среды.

Однако это не означает, что без трехмерного моделирования интерпретация показанных на рис. 3 кривых кажущегося удельного сопротивления вообще невозможна. Известно, что первый этап интерпретации данных электромагнитных зондирований заключается в районировании площади исследований по типам кривых кажущегося удельного сопротивления [Matveev, 1974].

Для большинства кривых ρ_t на рис. 3 характерно уменьшение кажущегося УЭС по мере увеличения времени регистрации и, соответственно, эффективной глубины зондирований [Matveev, 1974; Meju, 1995]. По типу эти кривые относятся к наблюдаемым при зондировании двухслойных геоэлектрических разрезов с проводящим основанием или трехслойных разрезов с промежуточным проводящим слоем [Matveev, 1974]. Среди таких кривых выделяются измеренные в Чернорудской зоне (показаны синим цветом), где на поздних временах кажущееся УЭС составляет от единиц

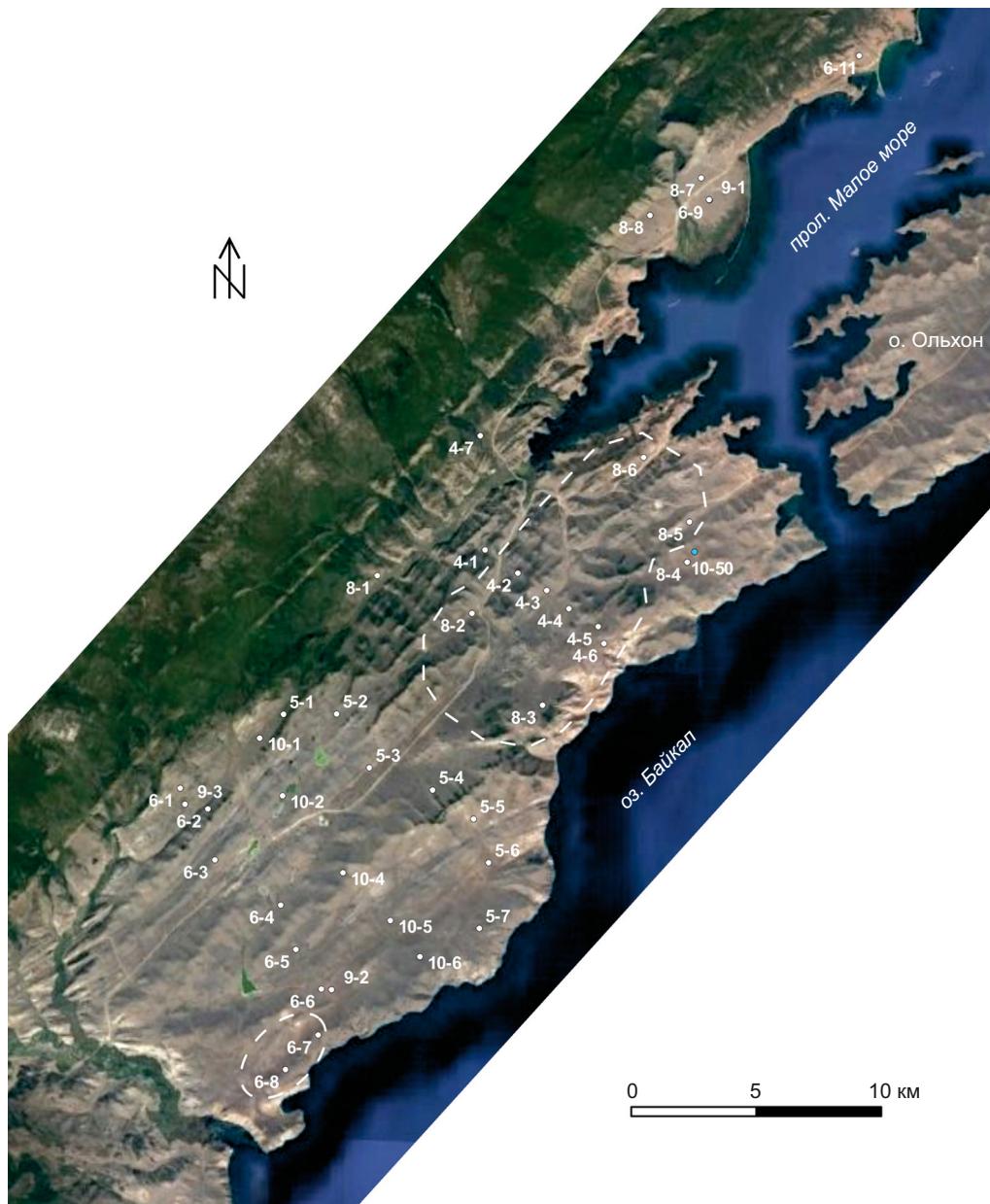


Рис. 2. Космоснимок района исследований с указанием положений центров и номеров генераторных петель. Штриховая линия оконтуривает участки распространения пород с высоким удельным электрическим сопротивлением.

Fig. 2. Satellite image of the study area with location of centers and numbers of transmitter loops. The dashed line outlines the resistive rocks areas.

до десяти Ом·м. По уровню большинство кривых ρ_t (показаны черным цветом) располагаются выше измеренных в Чернорудской зоне. Однако это кривые того же типа, что и характерные для Чернорудской зоны. Это указывает на то, что за ее пределами на глубине также залегают породы с удельным сопротивлением, намного более низким, чем у пород вышележащей толщи.

Красным цветом на рис. 3 выделены кривые ρ_t другого типа. Их отличает высокое (от $\approx 10^3$ до $\approx 10^4$ Ом·м) кажущееся УЭС на ранних временах, которое почти не уменьшается или даже возрастает на поздних временах. По сравнению с остальными эти кривые не удалось

зарегистрировать на временах более ≈ 10 мс, так как ЭДС переходного процесса быстро убывает до уровня шумов. На рис. 2 белой штриховой линией оконтурены две зоны, или области, в которых группируются «высокоомные» кривые. Одна из них располагается на северо-восточном, другая (ЗСБ 6-7, 6-8) – на юго-западном фланге площади работ.

Как уже упоминалось, для измерений с большими генераторными петлями использовались многоразносные установки. Результаты измерений с приемными петлями, вынесенные за пределы генераторной петли, подтвердили сделанный ранее вывод о том, что по сравнению с остальной территорией, где

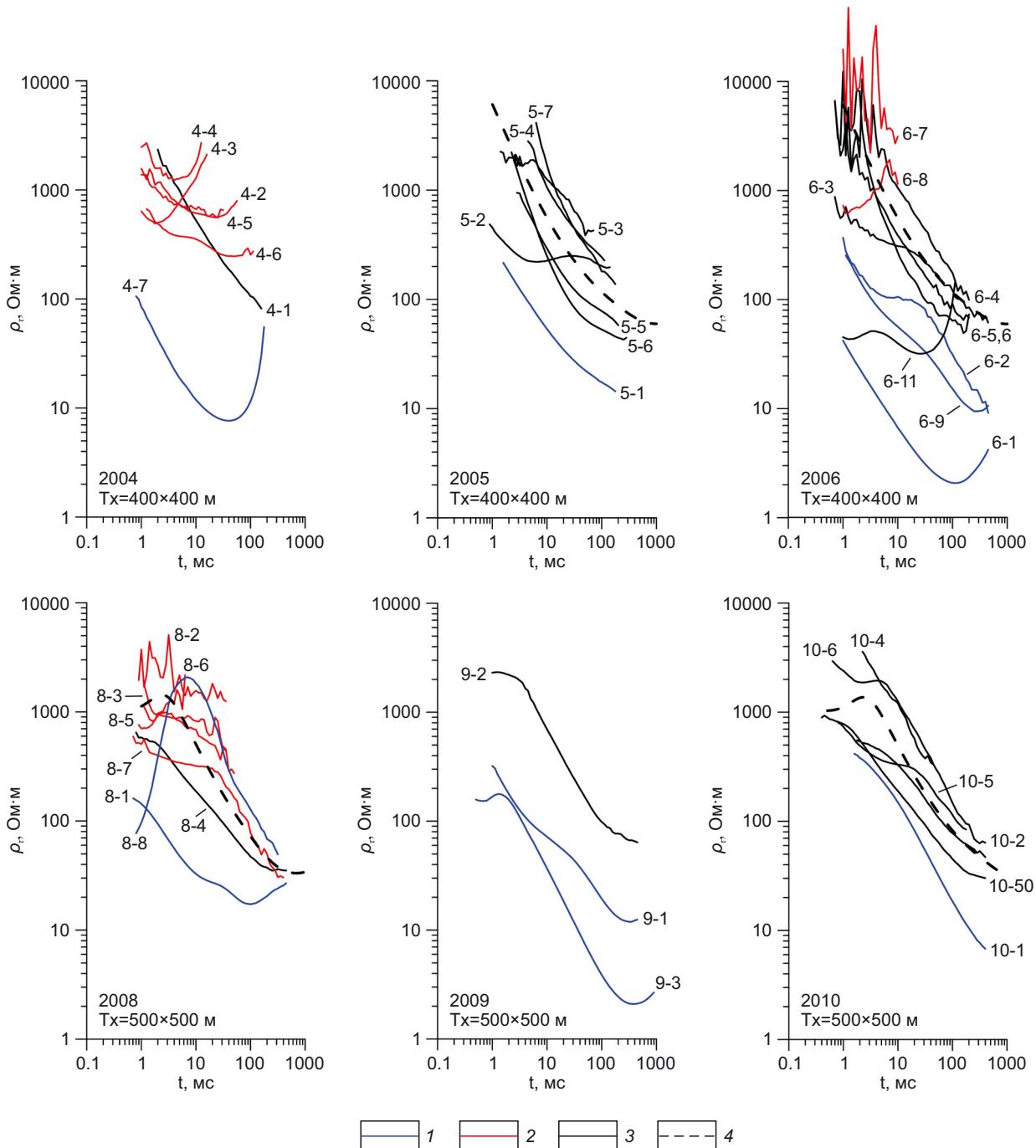


Рис. 3. Кривые кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_t метода ЗСБ. Зоны: 1 – Чернорудская, 2 – высоких, 3 – промежуточных сопротивлений; 4 – теоретические кривые, характеризующие типичные, или «средние», геоэлектрические модели зоны промежуточных сопротивлений.

Fig. 3. TEM apparent resistivity (ρ_t) curves. Zones: 1 – Chernorud, 2 – high-resistivity, 3 – intermediate-resistivity; 4 – theoretical curves for typical or average geoelectric models of intermediate resistivity areas.

проводились исследования, Чернорудская зона характеризуется наиболее сильными проявлениями неоднородного геоэлектрического строения и/или азимутальной анизотропии.

На рис. 4, а, изображена генераторная петля размером 400×400 м (ее центр на рис. 2 отмечен номером 4-7) и приемные петли размером 18×18 м. Здесь же приведены кривые кажущегося удельного сопротив-

ления, форма и уровень которых демонстрируют сильную зависимость от положения приемной петли. Это указывает на то, что геоэлектрический разрез здесь отличается от горизонтально-слоистого.

Иная картина наблюдается за пределами Чернорудской зоны. Это иллюстрирует рис. 4, б, на котором приведена схема расположения генераторной и приемных петель в пункте зондирований рядом с озерами

Холбо. На карте (см. рис. 2) центр генераторной петли показан под номером 4-1. Кривые кажущегося удельного сопротивления на рис. 4, б, не зависят от положения приемных петель. Приемные петли многоразносной установки на рис. 4, б, располагались вдоль линии, ориентированной вкрест простирания основных

структур Приольхонья. Именно вдоль этого направления можно было ожидать наибольших изменений кривых ρ_t и, соответственно, параметров геоэлектрического разреза. Поскольку кривые совпадают, геоэлектрическая модель земной коры в районе озер Холбо близка к горизонтально-слоистой.

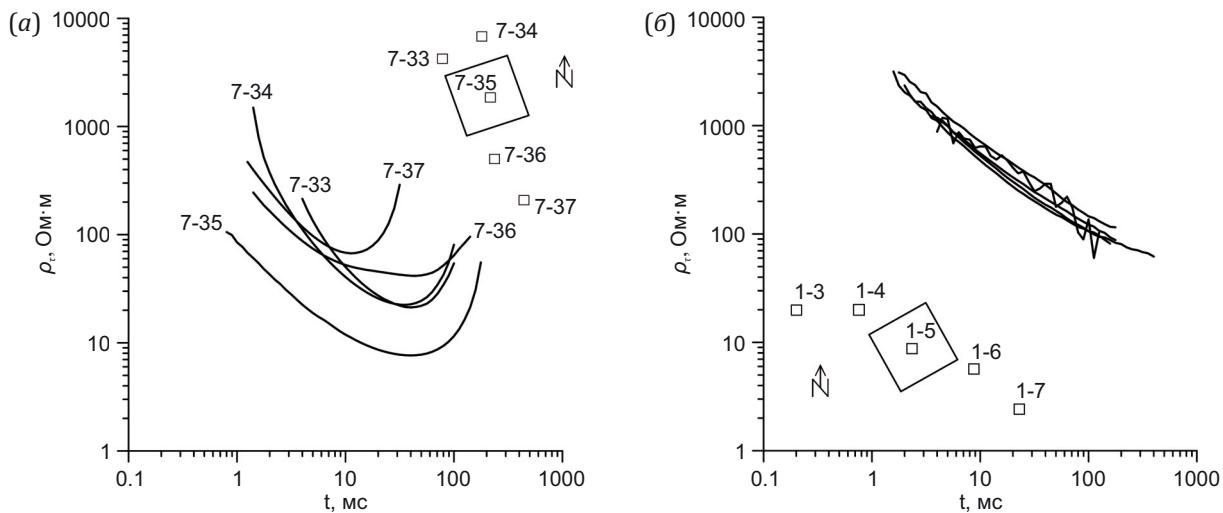


Рис. 4. Влияние положения приемной петли на кривые кажущегося удельного электрического сопротивления: (а) – Чернорудская зона, (б) – озёра Холбо. Генераторная петля 400×400 м. Приемные петли размером 18×18 м показаны не в масштабе.

Fig. 4. Effect of receiving loop position on apparent resistivity curves: (a) – Chernorud zone, (b) – Kholbo lakes. The transmitter loop is 400×400 m. 18×18 m receiving loops are not drawn to scale.

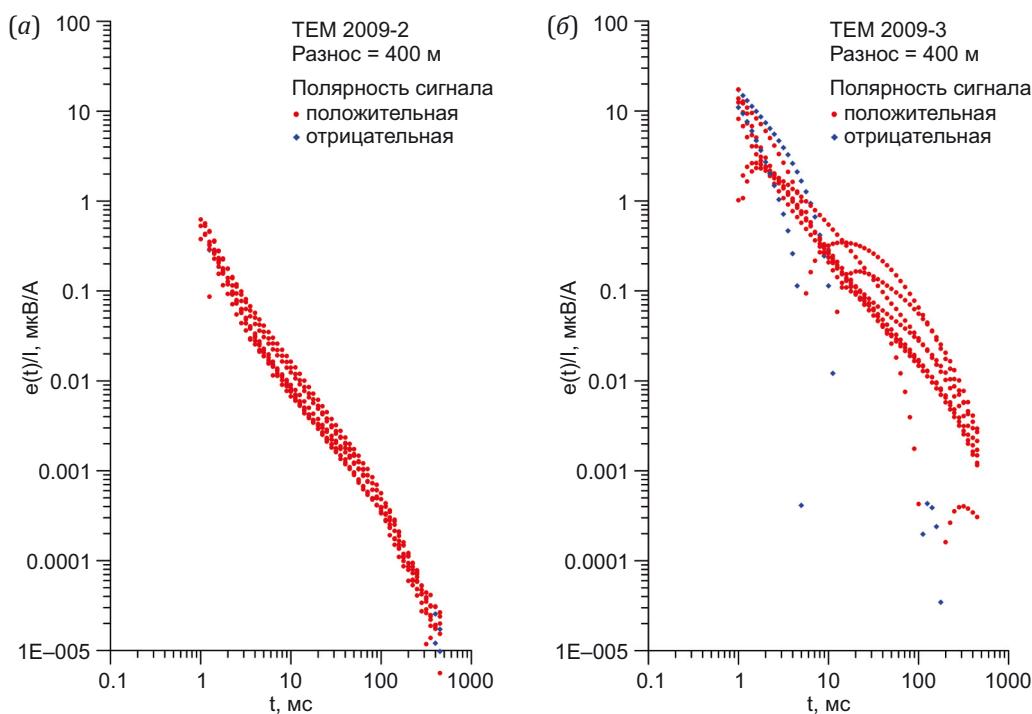


Рис. 5. Индукционные переходные характеристики, измеренные вблизи побережья оз. Байкал (а) и в Чернорудской зоне (б). Красным цветом показаны положительные, синим – отрицательные значения ЭДС, приведенные к току в генераторной петле. Генераторная петля 500×500 м, приемная – 18×18 м. Расстояние между центрами генераторной и приемной петель 400 м.

Fig. 5. Induction transient voltage responses measured near the shore of Lake Baikal (a) and in the Chernorud zone (b). Red and blue colors show, respectively, positive and negative voltages normalized to the current in the transmitter loop. The transmitter loop is 500×500 m, the receiving loop is 18×18 m. The distance between the centers of the transmitter and receiving loops is 400 m.

На рис. 5 показаны индукционные переходные характеристики, измеренные с генераторными петлями размером 500×500 м, центры которых располагались в пунктах 9-2 и 9-3 (см. карту на рис. 2). Приемная петля размером 18×18 м размещалась на окружности радиусом 400 м, центр которой совпадал с центром генераторной петли. Азимут, на котором приемная петля располагалась по отношению к линии, направленной на север и проходящей через центр генераторной петли, изменялся от 0 до 360° с шагом 45°.

Вблизи Байкала индукционные переходные характеристики совпадают на ранних (<1 мс) и поздних (>100 мс) временах, и лишь в середине временного диапазона отмечается небольшое отличие (рис. 5, а). Однако в Чернорудской зоне во всем временном диапазоне наблюдается сильная – вплоть до изменения полярности ЭДС – зависимость переходных характеристик от азимута (рис. 5, б).

3. ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЗСБ НА ОСНОВЕ ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТОЙ МОДЕЛИ

Результаты электроразведочных исследований в Приольхонье представляют собой, во-первых, объективные экспериментальные данные и, во-вторых, их интерпретацию, которая в той или иной степени является дискуссионной. Интерпретация включает «переход» от экспериментальных данных к геоэлектрическим моделям (инверсию) и геологическое истолкование последних.

Сложное геологическое строение района, отсутствие программ для экспрессного трехмерного моделирования и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований препятствуют построению полноценной трехмерной геоэлектрической модели Приольхонья. К этим факторам следует добавить низкую пространственную плотность зондирований. Вместе с тем даже без привлечения программ для моделирования и инверсии индукционных переходных процессов в средах с трехмерным распределением электропроводности имеющиеся данные позволяют сделать некоторые выводы о региональном геоэлектрическом строении Приольхонья и отметить неочевидные a priori дискуссионные моменты. Инверсия результатов зондирований, которые обсуждаются в настоящей статье, выполнена на основе горизонтально-слоистой модели с использованием автоматизированной системы для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований TEM-IP [Antonov et al., 2014].

Напомним, что при изучении горизонтально-слоистых разрезов с проводящим основанием или промежуточным проводящим слоем большой мощности кривые ρ_t характеризуются уникальной H -эквивалентностью [Matveev, 1974]. Она проявляется в том, что для таких разрезов по индукционным переходным характеристикам практически однозначно определяется суммарная мощность высокомоменной толщи, перекрывающей проводящие породы.

В контексте настоящей статьи важно, что H -эквивалентность проявляется и в тех случаях, когда среда является трехмерной, однако локально может быть представлена горизонтально-слоистой моделью с проводящим промежуточным слоем или основанием. Для таких геоэлектрических моделей глубина до кровли проводника, определенная посредством одномерной инверсии по нисходящей ветви кривой ρ_t для симметричной (соосной) установки, близка к истинной [Newman et al., 1987]. Под истинной в данном случае понимается глубина, на которой находится верхняя граница проводящих пород под центром генераторной петли.

Рис. 6 иллюстрирует возможности инверсии индивидуальных кривых кажущегося удельного сопротивления на основе горизонтально-слоистой модели. На рисунке приведены экспериментальные и модельные кривые ρ_t для зондирования 4-1 и 4-7 (см. рис. 2). Измерения выполнены соосной установкой с генераторной петлей размером 400×400 м. Модельная кривая ρ_t для зондирования 4-1 рассчитана для двухслойного разреза с проводящим основанием: $\rho_1=1460 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $H_1=1530 \text{ м}$, $\rho_2=35 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; кривая 4-7 – для трехслойной среды с промежуточным проводящим слоем: $\rho_1=1280 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $H_1=153 \text{ м}$, $\rho_2=3.6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $H_2=240 \text{ м}$, $\rho_3=2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

УЭС проводящих пород в Чернорудской зоне (ЗСБ 4-7) на порядок ниже, чем в окрестностях озер. Подбор горизонтально-слоистой модели для нисходящей ветви кривой ρ_t в пункте зондирования 4-7 позволяет определить глубину до кровли проводящих пород. Однако

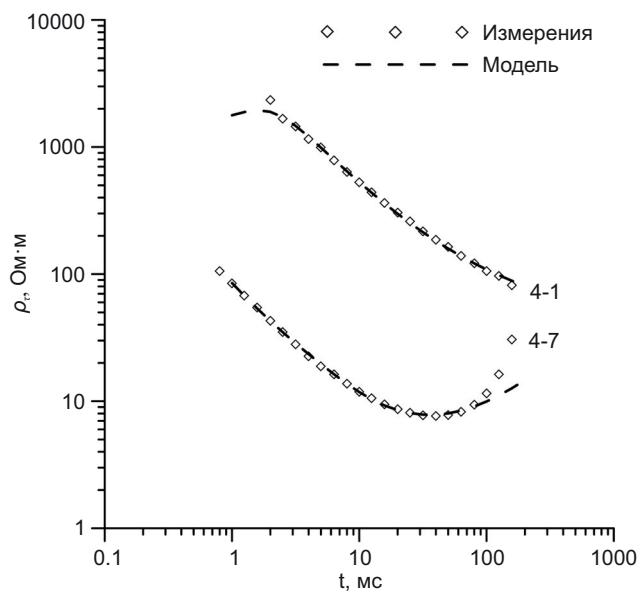


Рис. 6. Пример, иллюстрирующий возможности инверсии кривых ρ_t на основе модели горизонтально-слоистой проводящей среды. Установка «петля в петле» (Qq) с генераторной петлей размером 400×400 м.

Fig. 6. An example illustrating the feasibility of inversion of the ρ_t curves in terms of a horizontally layered, conductive ground model. Central loop (Qq) configuration with a 400×400 m transmitter loop.

подобрать такую горизонтально-слоистую модель, чтобы на поздних (>100 мс) временах рассчитанные значения ρ_t возрастали так же быстро, как экспериментальные, не удается. Это означает, что мощность и суммарная проводимость толщи низкоомных пород, найденные в результате инверсии на основе горизонтально-слоистой модели, дают минимальные оценки этих параметров.

Обратимся теперь к рис. 3, где показаны все кривые кажущегося удельного сопротивления, измеренные установкой Qq. В принципе, можно было бы, воспользовавшись средствами для инверсии данных ЗСБ на основе горизонтально-слоистой модели, выполнить инверсию каждой из кривых и представить результаты в виде геоэлектрических разрезов и/или карты, на которой показано распределение геоэлектрических параметров. Как уже отмечалось, приведенные на рис. 3 кривые ρ_t сильно отличаются, что указывает на неоднородное распределение электропроводности, поэтому на геоэлектрических разрезах, постоянных по результатам интерпретации на основе горизонтально-слоистой модели, могут проявиться 2D и 3D эффекты, или «картефакты». Их учет в настоящий момент не представляется возможным, что чревато ошибками в геологическом истолковании результатов зондирований. В связи с этим мы решили отказаться от подхода, основанного на интерпретации индивидуальных кривых, и вместо этого проиллюстрируем особенности регионального геоэлектрического строения исследуемой площади, которые не вызывают сомнений. В рамках этого подхода принципиальное значение имеет следующий факт. Хотя кривые ρ_t , сгруппированные по годам, отличаются, почти все они указывают на то, что удельное электрическое сопротивление залегающих на глубине пород намного меньше по сравнению с сопротивлением перекрывающей толщи, поэтому имеет смысл подобрать геоэлектрическую модель, характеризующую не индивидуальные кривые зондирований, а их набор «в целом», или «в среднем». На рис. 3 результат такого подбора для каждой группы показан штриховой линией. Соответствующие значения

Таблица 1. Обобщенные геоэлектрические модели для кривых кажущегося удельного электрического сопротивления на рис. 3

Table 1. Generalized geoelectric models for apparent resistivity curves in Fig. 3

Год	2005	2006	2008	2010
ρ_1 , Ом·м	10^4	10^4	10^3	10^3
H_1 , м	1500	1500	1500	1500
ρ_2 , Ом·м	40	40	15	20
H_2 , м	5000	5000	2000	5000
ρ_3 , Ом·м	200	200	200	200

удельного электрического сопротивления ρ и мощности слоев приведены в табл. 1.

Подбор кривых проводился на основе трехслойной модели. С учетом большой мощности второго слоя (2–5 км) логично принять, что на глубине от дневной поверхности до первых километров обобщенная геоэлектрическая модель соответствует двухслойной с проводящим основанием. Сверху залегает толща высокоомных пород с УЭС в диапазоне от 10^3 до 10^4 Ом·м, на глубине около 1.5 км подстилаемая проводящими породами с удельным сопротивлением 15–40 Ом·м.

4. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМОК МЕТОДОМ ЕП

Съемки методом ЕП проводились в рамках НИР и учебных геофизических практик для студентов ИрГТУ. Измерения выполнены способом потенциала вдоль профилей протяженностью от 2.7 до 13.5 км, ориентированных с северо-запада на юго-восток (рис. 7). На всех профилях в качестве референтной использовалась крайняя северо-западная точка, располагавшаяся у подножия уступа Приморского хребта. Измерения на профилях 1–6 выполнены с шагом 50 м, на профилях 7–9 шаг составлял 25 м.

Графики потенциала U ЕП приведены на рис. 8. По характеру изменения потенциала вдоль длинных профилей (3, 5, 9) выделяются два участка – северо-западный и юго-восточный. На северо-западном фланге наблюдаются узкие отрицательные аномалии большой амплитуды. К юго-востоку от них интенсивные аномалии потенциала отсутствуют.

На остальных профилях (1, 2, 4, 6–8), как и на северо-западном фланге профилей 3, 5, 9, наблюдаются интенсивные отрицательные аномалии, которые включают от одного (Пр1) до трех (Пр8) минимумов. По мере продвижения с северо-востока на юго-запад амплитуда аномалий, оцениваемая по разнице между максимальным и минимальным значением потенциала на профиле, увеличивается от 130 до 850 мВ.

При сопоставлении графиков потенциала ЕП с результатами геологических съемок обращает на себя внимание тот факт, что интенсивные отрицательные аномалии трассируют Чернорудскую, или Чернорудско-Баракчинскую, тектоническую зону. Отвечая на вопрос, почему именно эта зона выделяется интенсивными отрицательными аномалиями ЕП, отметим широкое развитие здесь интенсивно дислоцированных графитизированных пород – углеродистых тектонитов [Letnikov et al., 1997; Savelyeva, 1998].

Напомним, что по данным электромагнитных зондирований в пределах изученной площади (см. рис. 2) зона трассируется не только отрицательными аномалиями ЕП, но очень низким (от десятков до десятых долей Ом·м) УЭС. Это свидетельствует о том, что, вероятнее всего, аномалии ЕП создаются геобатареей, образованной крутопадающим проводником с электронной проводимостью, который располагается во вмещающих породах с ионной проводимостью [Bigalke,

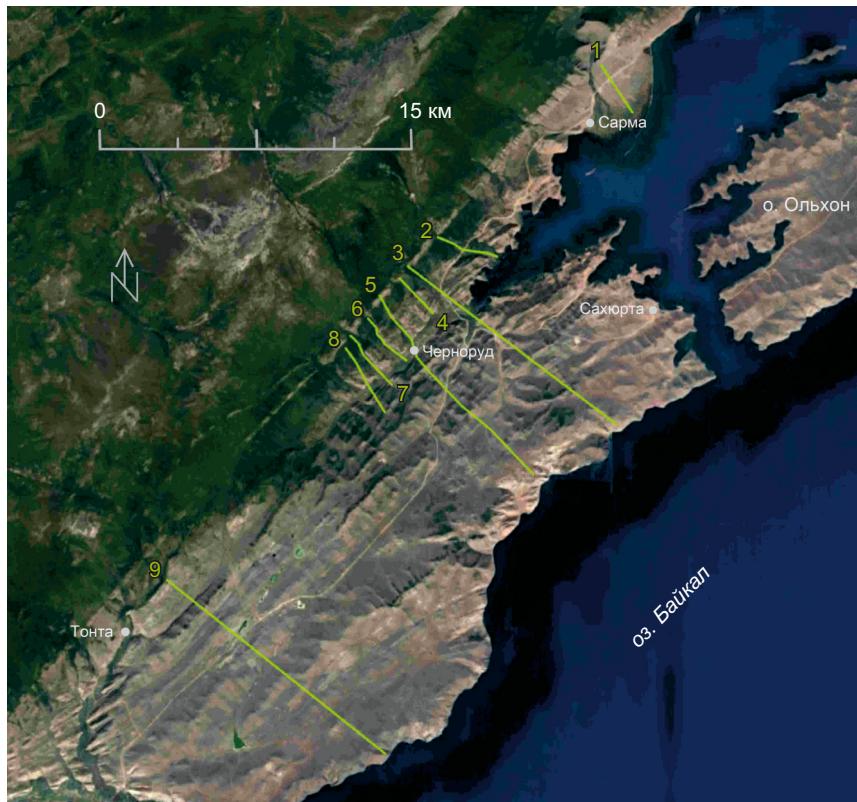


Рис. 7. Региональные профили ЕП и их номера.

Fig. 7. Regional SP profiles and their numbers.

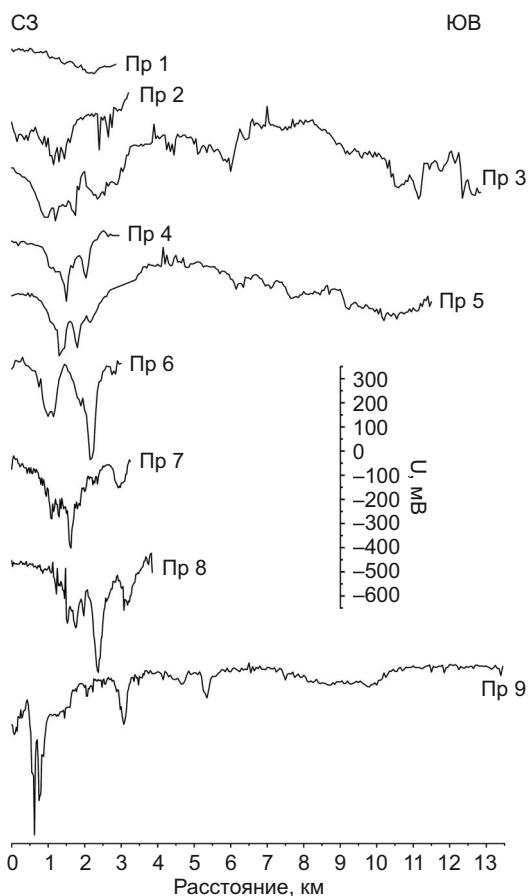


Рис. 8. Графики потенциала естественного электрического поля вдоль региональных профилей 1–9 (см. рис. 7).

Fig. 8. SP-graphs along regional profiles 1–9 (see Fig. 7).

[Grabner, 1997; Stoll et al., 1995]. Направленный вверх поток электронов в инертном проводнике возникает за счет разности окислительно-восстановительного потенциала (Eh) на глубине и вблизи поверхности. Одновременно с движением электронов в проводнике в окружающих породах перемещаются ионы, благодаря чему поддерживается электрическая нейтральность всей системы. Падение напряжения при протекании тока ионов во вмещающих породах проявляется как потенциал ЕП.

В большинстве случаев электронный проводник геобатареи представляет собой обогащенную графитом кругопадающую тектоническую зону или систему таких зон. Высокое содержание графита в породах не является достаточным условием для работы геобатареи. Необходимо, чтобы графитовая минерализация образовывала непрерывные токопроводящие системы [Bigalke, Grabner, 1997; Stoll et al., 1995]. Их формированию способствуют сдвиговые деформации [Nover et al., 2005; Mehanee, 2015].

Амплитуда, ширина и форма аномалий зависят от размеров, геометрии и удельной поверхности проводника, глубины его залегания, распределения Eh во вмещающих ионопроводящих породах и кинетики электрохимических процессов [Bigalke, Grabner, 1997]. Инверсия данных метода ЕП с учетом перечисленных факторов делает возможным изучение окислительно-восстановительной обстановки на глубинах, недоступных для прямых измерений.

Как отмечалось выше, на уровне современного эрозионного среза границы Чернорудской зоны близки к

таковым Чернорудского (Бугульдайско-Чернорудского) грабена. Таким образом, аномалии потенциала ЕП (см. рис. 7) трассируют как Чернорудскую зону, так и Чернорудский грабен. Поскольку, с одной стороны, Чернорудская зона существовала до появления грабена, а с другой – положение этих структур в плане совпадает, возникает вопрос: почему наибольшие нарушенность и субвертикальные перемещения, в результате которых образовался грабен, наблюдаются в пределах древней Чернорудской зоны.

Как уже упоминалось, породы зоны характеризуются высоким содержанием графита. Наличие в породах графита, особенно в виде непрерывной, связанной системы, приводит к драматическому снижению их модуля сдвига. Результаты электроразведочных исследований указывают на то, что графит в Чернорудской зоне представлен такой системой, поэтому при возникновении субвертикальных сдвиговых напряжений, которые были инициированы в кайнозое, именно здесь происходили и происходят перемещения большой амплитуды [Kozhevnikov, 2010]. Напомним, что согласно результатам структурно-геологических исследований в зоне влияния Приморского разлома породы Чернорудского грабена характеризуются интенсивными проявлениями неотектонической раздробленности [Arzhannikova, Gofman, 2000].

Известно, что напряжения сдвига способствуют преобразованию содержащих углерод флюидов в графит, образующий электрически связанные системы с высокой электропроводностью [Nover et al., 2005], которые можно «увидеть» с помощью электроразведочных методов. Однако в литературе, где описываются результаты изучения тектоники Приольхонья, не нашел должного отражения тот факт, что наиболее интенсивные сдвиговые деформации должны происходить там, где уже присутствует графитовая минерализация [Oohashi et al., 2013]. Очевидно, коль скоро речь идет о формировании грабена, преимущественный интерес представляют крутопадающие зоны с графитом, образующим протяженные, непрерывные системы, которые трассируются с помощью метода ЕП в Чернорудско-Баракчинской зоне глубинного разлома.

5. ДИСКУССИЯ

Как уже отмечалось, работы 2004–2010 гг. методом ЗСБ с мощным источником подтвердили сделанный ранее вывод о том, что главными элементами региональной геоэлектрической модели Приольхонья являются северо-западный и юго-восточный тектонические блоки [Kozhevnikov et al., 2004]. Вместе с тем благодаря увеличению глубины зондирований удалось получить более полное представление о геоэлектрическом строении района исследований.

Для большинства кривых ρ_t , измеренных в 2004–2010 гг., характерно быстрое снижение кажущегося УЭС со временем. Это наглядно иллюстрирует рис. 9, на котором все кривые, приведенные на рис. 3, показаны вместе.

Согласно результатам интерпретации этих кривых (см. рис. 3; табл. 1), на большей части территории юго-восточного блока под высокоомной ($\rho=10^3\text{--}10^4 \Omega\cdot\text{м}$) толщей залегают породы с низким УЭС (15–40 $\Omega\cdot\text{м}$). Для каждой из совокупностей кривых зондирований, показанных на рис. 3, глубина кровли проводящих пород в среднем составляет ≈ 1500 м. Это дает основание предполагать, что в целом, или в среднем, кровля проводящей толщи характеризуется пологим залеганием, возможно близким к субгоризонтальному. Поскольку для пород Ольхонского метаморфического комплекса характерны крутые углы падения слоистости [Kuklei, 1985; Kochnev, 2007; Fedorovsky, Skyarov, 2010], необходимо объяснить сочетание крутых углов падения, видимых на поверхности современного эрозионного среза, и полого залегания кровли проводящих пород. Другая проблема связана с тем, что юго-восточный блок сложен метаморфическими породами, УЭС которых обычно находится в диапазоне от сотен до десятков тысяч $\Omega\cdot\text{м}$ [Kobranova, 1986]. Это в $10\text{--}10^3$ раз больше по сравнению с УЭС пород, кровля которых залегает на глубине около 1.5 км.

Имеются несколько типов пород с удельным электрическим сопротивлением порядка первых десятков $\Omega\cdot\text{м}$. Во-первых, влажные осадочные (преимущественно пелитовые) породы, содержащие мелкодисперсные частицы, например такие, из которых состоят глины или илы. Во-вторых, любые пористые и трещинно-карбонатные породы, насыщенные минерализованными водами, т.е. водными растворами электролита. И, наконец, породы, содержащие электронопроводящие минералы, такие как сульфиды или графит в виде протяженных, электрически связанных систем.

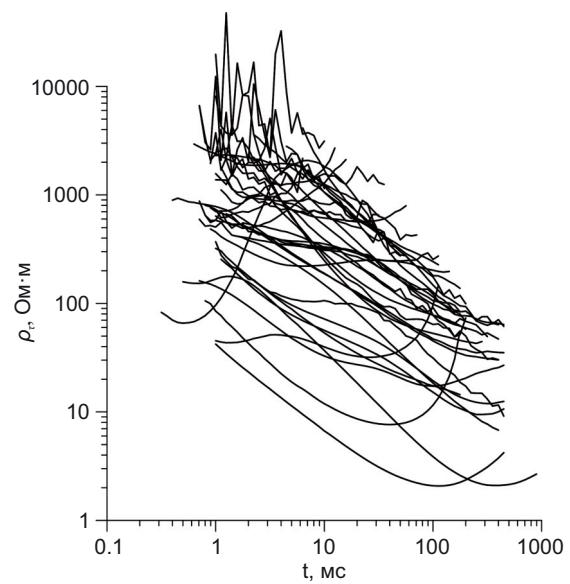


Рис. 9. Кривые кажущегося УЭС, измеренные в 2004–2010 гг. симметричными установками (Qq) с генераторными петлями размером 400×400 и 500×500 м.

Fig. 9. Central loop (Qq) apparent resistivity curves measured in 2004–2010 with 400×400 and 500×500 m transmitter loops.

Для обоснования первого варианта следует объяснить, каким образом среди метаморфических пород, образовавшихся на большой глубине при высоких температурах и давлениях, оказались осадочные породы. Во втором случае возникают вопросы: почему метаморфические породы имеют высокую пористость и откуда появились минерализованные воды. И, наконец, гипотеза о том, что причиной низкого УЭС залегающих под высокоомной толщой пород явления являются электроно-проводящие минералы, должна объяснить, откуда они появились и в результате каких процессов образовали электрически связанный протяженную систему.

Ранее такая же проблема возникла в связи с необходимостью дать геологическую интерпретацию субгоризонтальным проводникам Чернорудской зоны. Напомним, что уже первые работы методом ЗСБ обнаружили здесь породы с низким (порядка единиц – первых десятков Ом·м) УЭС, кровля которых залегает на глубине от 100 до 400 м [Kozhevnikov et al., 2004].

Геологическая природа субгоризонтальных проводников в Чернорудской зоне обсуждается в работе [Kozhevnikov et al., 2004]. В числе прочих в ней приводится гипотеза, согласно которой проводник является зоной надвиговых дислокаций, а перекрывающие его породы – аллохтоном. Эту гипотезу при обсуждении материалов, представленных в упомянутой работе, высказал В.Д. Мац. По его мнению, предположение о надвиговой природе субгоризонтального проводника согласуется с современной концепцией геологического развития Приольхонья [Fedorovsky et al., 1995]. Согласно этой концепции Приольхонье представляет собой раннепалеозойскую коллизионную систему, включающую тектонические пластины и чешуи различной геодинамической природы. Надвиговые структуры образовались в процессе коллизии на глубинах порядка 10 км и в последующем оказались поднятыми к поверхности.

Другой возможный вариант интерпретации содержится в комментариях, высказанных по поводу настоящей статьи Е.В. Скляровым. По его мнению, пологие

проводники в толще метаморфических пород Приольхонья могли образоваться в результате листрического сброса большого блока в процессе байкальского тектогенеза. Зона сброса могла быть насыщена графитом, на что, в частности, указывают обнаруженные в Чернорудской зоне позднеплейстоценовые гейзериты, которые часто содержат большое количество графита.

Однако применительно к Чернорудской зоне гипотеза о субгоризонтальном залегании проводящей толщи плохо согласуется с результатами метода ЕП. Напомним, что зона трассируется отрицательными аномалиями естественного электрического поля большой амплитуды (см. рис. 8). Обычно подобные аномалии наблюдаются над электронными проводниками, представленными крутопадающими зонами с графитовой минерализацией [Bigalke, Grabner, 1997; Mehane, 2015; Nover et al., 2005; Stoll et al., 1995]. В Приольхонье такие зоны могли сформироваться в результате сдвиговых напряжений и деформаций, способствующих распределению графита в виде непрерывных, электрически связанных токопроводящих систем.

Очевидно, проблема геологической интерпретации результатов съемок методами ЗСБ и ЕП в Чернорудской зоне заключается в том, чтобы объяснить, как при субгоризонтальном залегании электронного проводника возникают отрицательные аномалии ЕП большой амплитуды. Кроме этого, остается открытым вопрос о механизме обогащения зоны надвиговых дислокаций графитом.

В работе [Shein et al., 2013] средствами трехмерного математического моделирования обоснован альтернативный вариант интерпретации проводников в Чернорудской зоне. Его суть заключается в том, что субгоризонтальным залеганием характеризуются не сами проводящие породы, а огибающая верхних кромок субвертикальных проводящих слоев. Это иллюстрирует рис. 10, где показана вмещающая среда с УЭС ρ_1 , в которой находится «пакет» из вертикальных проводников с удельным сопротивлением $\rho_2 \ll \rho_1$. Как оказалось,

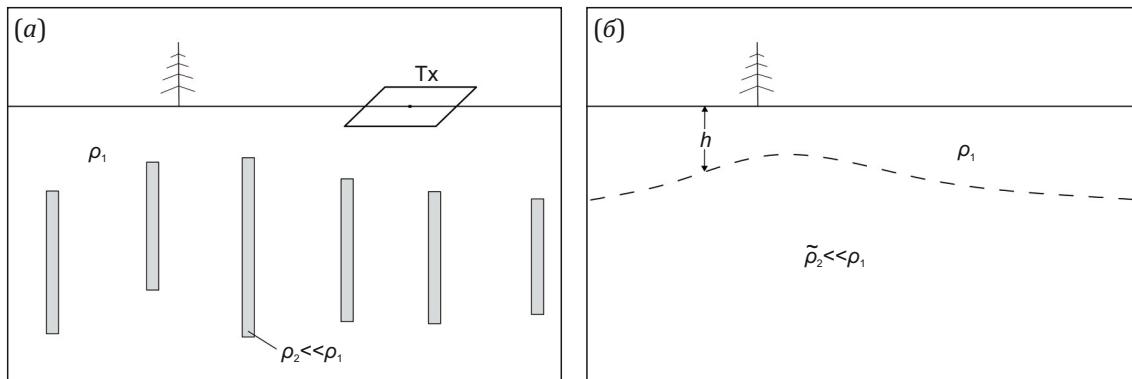


Рис. 10. Вертикальные проводники в слабопроводящей вмещающей среде и расположенная на поверхности генераторная петля (а). Инверсия данных ЗСБ на основе горизонтально-слоистой модели позволяет оценить глубину h до огибающей верхней кромки проводников (б).

Fig. 10. Vertical conductors in a weakly conductive host medium and a surface transmitter loop (a). Inversion of the TEM data in terms of the horizontally layered earth model yields the depth h to the envelope of the conductors' upper edges (b).

инверсия данных ЗСБ в рамках горизонтально-слоистой модели дает глубину h до огибающей верхней кромки проводников. Хотя найденное в результате инверсии данных ЗСБ эффективное сопротивление $\tilde{\rho}_2$ субгоризонтального проводника больше, чем сопротивление крутопадающих пластов, оно остается низким по сравнению с сопротивлением вмещающих пород: $\tilde{\rho}_2 \ll \rho_1$. Таким образом, показанная на [рис. 10](#) геоэлектрическая модель позволяет согласовать результаты съемок методами ЗСБ и ЕП. Вместе с тем при ее геологической интерпретации остается открытым вопрос: почему верхняя кромка вертикальных проводников характеризуется пологим залеганием.

Логично ожидать, что при изучении среды, геоэлектрическая модель которой представлена на [рис. 10](#), должны наблюдаться сильные эффекты азимутальной анизотропии и/или латеральной неоднородности УЭС. Как показали зондирования многоразносными и круговыми установками, такие эффекты проявляются в Чернорудской зоне, однако слабо выражены за ее пределами (см. [рис. 4, 5](#)). Этот факт и отсутствие на территории юго-восточного блока отрицательных аномалий ЕП большой амплитуды говорят о том, что геоэлектрическая модель юго-восточного блока вряд ли соответствует показанной на [рис. 10](#). Скорее всего, здесь под высокомощной толщей находятся проводящие породы, кровля которых в целом залегает полого на глубине около 1.5 км. Геологическая природа этой проводящей структуры остается невыясненной. В качестве предварительной гипотезы можно предположить, что она представляет собой зону катаклаза, рассланцевания, милонитизации и пластического течения пород, связанную с крупным тектоническим нарушением регионального ранга. Однако для того чтобы эта гипотеза выглядела убедительной, необходимо объяснить значительную – от 2 до 5 км – вертикальную мощность зоны.

Среди результатов съемок методом ЗСБ с большими генераторными петлями есть еще один факт, заслуживающий обсуждения. Как уже отмечалось, в пределах юго-восточного блока выделены две изометричные в плане области с высоким удельным сопротивлением, которое не понижается с глубиной (см. [рис. 2](#)), поэтому в общих чертах геоэлектрическая модель массива горных пород к юго-востоку от Чернорудской зоны может быть представлена в виде блока, образованного двухслойной средой с проводящим основанием (кровля которого или, возможно, ее «огибающая» характеризуется пологим залеганием), и двумя высокомощными областями, или «включениями». Большая из этих областей, которая располагается на северо-восточном фланге площади работ (см. [рис. 2](#)), пространственно коррелирует с Кучулгинской положительной аномалией силы тяжести и расположенной там же положительной магнитной аномалией [[Turutanov, 2011](#)]. Этот факт указывает на то, что данное высокомощное «включение», скорее всего, представляет собой интрузию основного состава из числа тех, которые подроб-

но рассматриваются в упомянутой выше монографии Е.Х. Турутанова.

На современной стадии геологической и геофизической изученности юго-восточного блока едва ли возможно дать в полной мере обоснованную геологическую интерпретацию его геоэлектрической модели. Вместе с тем необходимо отметить два объективных результата: 1) изометричные в плане зоны высокого электрического сопротивления не коррелируют с «рисунком» геологических карт Приольхонья [[Kochnev, 2007; Kuklei, 1985; Fedorovsky, Sklyarov, 2010](#)]; 2) в юго-восточном блоке на глубине около 1.5 км находится толща проводящих пород с пологим (в среднем) залеганием кровли.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы методом ЗСБ с большими генераторными петлями подтвердили сделанный ранее вывод о том, что в региональном плане геоэлектрическая модель Приольхонья включает северо-западный и юго-восточный блоки, граница между которыми проходит по Кучулгинскому разлому.

В геологическом отношении северо-западный блок представлен Чернорудской, или Чернорудско-Баракчинской, тектонической зоной. Здесь по данным ЗСБ обнаружены породы низкого (от долей единицы до первых десятков Ом·м) УЭС. Сделанный ранее вывод о субгоризонтальном залегании их кровли не согласуется с тем фактом, что Чернорудская зона отмечается интенсивными, с амплитудой до 900 мВ, отрицательными аномалиями ЕП. Подобные аномалии обычно наблюдаются над крутопадающими электронными проводниками с электрически связанный графитовой минерализацией, расположенным в ионопроводящих вмещающих породах. Как показало трехмерное математическое моделирование, скорее всего, с помощью метода ЗСБ прослеживается не кровля пород с субгоризонтальным залеганием, а огибающая верхних кромок субвертикальных электронных проводников.

Что касается юго-восточного блока, то здесь по данным ЗСБ обнаружены породы с низким (15–40 Ом·м) УЭС, кровля которых в среднем залегает субгоризонтально на глубине около 1.5 км. На северо-восточном и юго-западном флангах блока оконтурены участки с высоким сопротивлением. Геологическая природа проводящей толщи и высокомощных «включений» остается дискуссионной.

Эффективность электроразведки при изучении региональной структуры Приольхонья связана с присутствием в метаморфических породах графита, образующего протяженные, электрически связанные системы. Они трассируют существовавшие в прошлом пути миграции содержащих углерод флюидов и определяют локализацию участков в земной коре, где под действием напряжений происходили, а возможно происходят сейчас, тектонические подвижки.

Важный результат съемок методами ЗСБ и ЕП в Приольхонье заключается в вопросах, которые возникли

в ходе этих исследований; на эти вопросы пока нет однозначных ответов в рамках современной концепции геологического строения Ольхонского региона. Очевидно, для ответа на них необходимо проведение специально спланированных масштабных работ комплексом геофизических методов.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность студентам-геофизикам ИрНИТУ за участие в проведении геофизических съемок в Приольхонье, а также И.В. Буддо, В.И. Попспееву, К.Ж. Семинскому, Е.В. Склярову за комментарии, которые были учтены при подготовке окончательной версии статьи.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Antonov E.Y., Kozhevnikov N.O., Korsakov M.A., 2014. Software for Inversion of Tem Data Affected by Fast-Decaying Induced Polarization. Russian Geology and Geophysics 55 (8), 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.07.009>.

Arzhannikova A.V., Gofman L.E., 2000. Neotectonics in the Primorsky Fault Zone. Russian Geology and Geophysics 41 (6), 811–818 (in Russian) [Аржанникова А.В., Гофман Л.Е. Проявление неотектоники в зоне влияния Приморского разлома // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 6. С. 811–818].

Bigalke J., Grabner E.W., 1997. The Geobattery Model – A Contribution to Large Scale Electrochemistry. Electrochimica Acta 42 (23–24), 3443–3452. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(97)00053-4).

Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., 2010. The Olkhon Geodynamic Proving Ground (Lake Baikal): High-Resolution Satellite Data and Geological Maps of New Generation. Geodynamics & Tectonophysics 1 (4), 331–418 (in Russian) [Федоровский В.С., Скляров Е.В. Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические данные высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 331–418]. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-4-0026>.

Fedorovsky V.S., Vladimirov A.G., Khain E.V., Kargopolov S.A., Gibsher A.S., Izokh A.E., 1995. Tectonics, Metamorphism, and Magmatism of Collision Zones in Early Paleozoic Orogenic Complexes of Central Asia. Geotectonics 3, 3–22 (in

Russian) [Федоровский В.С., Владимиров А.Г., Хайн Е.В., Каргополов С.А., Гибшер А.С., Изокх А.Э. Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизионных зон каледонид Центральной Азии // Геотектоника. 1995. Т. 29. № 3. С. 3–22].

Kobranova V.N., 1986. Petrophysics. Textbook for Universities. Nedra, Moscow, 392 p. (in Russian) [Кобранова В.Н. Петрофизика: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 392 с.].

Kochnev A.P., 2007. The Olkhon Crystalline Complex. The Problems of Geology and Minerageny of Priolkhonye. ISTU Publishing House, Irkutsk, 252 p. (in Russian) [Кочнев А.П. Ольхонский кристаллический комплекс. Проблемы геологии и минерагении Приольхонья. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 252 с.].

Kozhevnikov N.O., 2010. Geoelectric Model of Priolkhonye and Its Relationship with the Maloe More Rift Structure. In: Cenozoic Continental Rifting. Proceedings of the All-Russian Symposium with International Participation, Dedicated to the Memory of N.A. Logachev, Academician of RAS, in Connection with His 80th Birth Anniversary (June 7–11, 2010). Vol. 1. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 167–170 (in Russian) [Кожевников Н.О. Геоэлектрическая модель Приольхонья и ее связь со структурой Маломорского рифта // Кайнозойский континентальный рифтогенез: Материалы Всероссийского симпозиума с международным участием, посвященного памяти академика РАН Н.А. Логачева в связи с его 80-летием (7–11 июня 2010 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. Т. 1. С. 167–170].

Kozhevnikov N.O., Bigalke J., Kozhevnikov O.K., 2004. Geo-electrical Surveys in the Ol'khon Region: Methods, Results, and Tectonic Implications. Russian Geology and Geophysics 45 (2), 253–265 (in Russian) [Кожевников Н.О., Бигальке Ю., Кожевников О.К. Региональная структура Приольхонья по данным геоэлектрических исследований // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 2. С. 253–265].

Kuklej L.N., 1985. The Precambrian Western Pribaikalia. Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Science, Moscow, 189 p. (in Russian) [Куклей Л.Н. Докембрый Западного Прибайкалья. М.: ИФЗ АН СССР, 1985. 189 с.].

Letnikov F.A., Savelieva V.B., Zairi N.M., 1997. Endogenous Processes and Graphite Mineralization in the Chernorudsky-Barakchinsky Tectonic Zone (Western Prebaikalia). Russian Geology and Geophysics 38 (3), 700–705.

Matveev B.K., 1974. Interpretation of Electromagnetic Soundings. Nedra, Moscow, 232 p. (in Russian) [Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1974. 232 с.].

Mehanee S., 2015. Tracing of Paleo-Shear Zones by Self-Potential Data Inversion: Case Studies from the KTB, Ritstteig, and Grossensees Graphite-Bearing Fault Planes. Earth, Planets and Space 67, 14. <https://doi.org/10.1186/s4062-3-014-0174-y>.

Meju M.A., 1995. Simple Effective Resistivity-Depth Transformations for Infield and Real-Time Data Processing. Computers & Geosciences 21 (8), 985–992. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00035-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00035-7).

Newman G.A., Anderson W.L., Hohmann G.W., 1987. Interpretation of Transient Electromagnetic Soundings over Three-Dimensional Structures for the Central Loop Configuration. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 89 (3), 889–914. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb05200.x>.

Nover G., Stoll J.B., Gönna J., 2005. Promotion of Graphite Formation by Tectonic Stress – A Laboratory Experiment. *Geophysical Journal International* 160 (3), 1059–1067. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02395.x>.

Ohashi K., Hirose T., Shimamoto T., 2013. Graphite as a Lubricating Agent in Fault Zones: An Insight from Low- to High-Velocity Friction Experiments on a Mixed Graphite-Quartz Gouge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (5), 2067–2084. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50175>.

Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Sharlov M.V., Kompaniets S.V., Tokareva O.V., Misurkeeva N.V., Gomulsky V.V. et al., 2018. Modern Practical Electrical Prospecting. GEO, Novosibirsk, 231 p. (in Russian) [Поспев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Компаниец С.В., Токарева О.В., Мисуркеева Н.В., Гомульский В.В. и др. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с.]

Savelyeva V.B., 1998. Carboniferous Tectonites of the Chernorud-Barakcha Deep-Seated Fault Zone (West Pri-baikalye). *Zapiski All-Russian Mineralogical Society CXXVII* (3), 12–21 (in Russian) [Савельева В.Б. Углеродистые тектониты Чернорудско-Баракчинской зоны глубинного разлома (Западное Прибайкалье) // Записки ВМО. 1998. Ч. CXXVII. № 3. С. 12–21].

Shein A.N., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., 2013. 3D Geoelectrical Model of Chernorud Area in Ol'khon Region:

Description and Results of Modeling Transient Induction Signals by Program Modem3D. In: *Interexpo Geo-Sibir-2013. Proceedings of the IX International Congress and the Exhibition (April 15–26, 2013)*. Vol. 2. SSUGT, Novosibirsk, p. 18–23 (in Russian) [Шеин А.Н., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Трехмерная геоэлектрическая модель Чернорудской зоны Приольхонья: описание и результаты расчетов индукционных переходных характеристик с помощью программы Modem3D // Интерэкспо Гео-Сибирь-2013: Материалы IX международного конгресса и выставки (15–26 апреля 2013 г.). Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. С. 18–23].

Smolyansky E.N., Gonchar G.A., 2001. Major Neotectonic Features of Priolkhonye. In: *Geophysics at the Threshold of the Third Millennium. Transactions of the Second Baikal Youth School-Seminar (August 20–25, 2001)*. ISTU Publishing House, Irkutsk, p. 5–21 (in Russian) [Смолянский Е.Н., Гончар Г.А. Основные черты неотектоники Приольхонья // Геофизика на пороге третьего тысячелетия: Труды второй Байкальской молодежной школы-семинара (20–25 августа 2001 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. С. 5–21].

Stoll J., Bigalke J., Grabner E.W., 1995. Electrochemical Modelling of Self-Potential Anomalies. *Surveys in Geophysics* 16 (1), 107–120. <https://doi.org/10.1007/BF00682715>.

Turutanov E.Kh., 2011. Morphology of Basite Intrusions in the Olkhon Region from the Gravimagnetic Data (West Pri-baikalye). *ISTU Publishing House, Irkutsk*, 204 p. (in Russian) [Турутанов Е.Х. Морфология базитовых интрузий Ольхонского региона по гравимагнитным данным (Западное Прибайкалье). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. 204 с.]