

Н. О. Кожевников^{1}, М. В. Шарлов²*

Графит и геофизические аномалии в пади Барун-Хал (Приольхонье, Западное Прибайкалье)

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² СИГМА-ГЕО, г. Иркутск, Российская Федерация
*e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье обсуждаются результаты детальных геофизических съемок с целью изучения графитизированных пород Приольхонья. Круто падающие зоны с электрически-связанной графитовой минерализацией отмечаются интенсивными, с амплитудой до 800 мВ, отрицательными аномалиями естественного электрического поля, положительными аномалиями магнитного поля и очень низкими (около 0.2 Ом×м) удельными электрическими сопротивлениями. Высказывается предположение, что при взаимодействии содержащих СО₂ флюидов с проницаемыми породами в последних отлагались графит и магнетит. Наличие графита вызвало локализацию деформаций в проницаемых породах Чернорудской зоны и, таким образом, влияло на ее строение и эволюцию. Геофизические методы дают возможность проследить древние пути миграции глубинных флюидов, что может представлять интерес для изучения палео- и неотектоники Приольхонья.

Ключевые слова: Приольхонье, геофизические аномалии, графит

N. O. Kozhevnikov^{1}, M. V. Sharlov²*

Graphite and geophysical anomalies in the Barun-Khal valley (Olkhon region, Western Gisbaikalia)

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

² Sigma-Geo, Irkutsk, Russian Federation
*e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article discusses the results of using geophysical methods to study graphite-bearing rocks in the Olkhon region. Steeply dipping zones with electrically interconnected graphite mineralization are marked by intense, with the amplitude of 800 mV, negative self-potential anomalies, positive magnetic anomalies and very low (about 0.2 Ω·m) electrical resistivities. It is suggested that when CO₂-containing fluids interacted with permeable rocks, graphite and magnetite were deposited in the latter. The presence of graphite caused localization of deformations in the permeable rocks of the Chernorud zone and, thus, influenced its structure and evolution. Geophysical methods enable tracing the ancient migration paths of deep fluids, which may be of interest for studying the tectonic evolution of the Olkhon region.

Keywords: Olkhon region, geophysical anomalies, graphite

Введение

Приольхонье является одним из опорных/эталонных геологических полигонов [5]. Этот район изучен наземными геологическими съемками, с помощью дешифрирования данных дистанционных съемок, а также геохимических исследований и определения абсолютного возраста пород. Однако его геофизическая изученность оставляет желать лучшего. Такое состояние нельзя признать удовлетворительным, особенно с учетом той роли, которые современные геофизические методы играют в геологии. Поэтому любой опыт применения здесь геофизических методов интересен сам по себе и как основа для проектирования геофизических исследований, которые со временем будут развернуты в Ольхонском регионе.

Среди геофизических аномалий Приольхонья особый интерес представляют наблюдаемые над содержащими графит породами. Слои и зоны с электрически связанной графитовой минерализацией, «встроенные» в породы Ольхонского метаморфического комплекса, являются благоприятными объектами для выделения их методами естественного электрического поля (ЕП) и зондирования методом переходных процессов (ЗМПП). В большинстве случаев формирование электрически связанной графитовой минерализации контролировалось тектоническими процессами, поэтому изучение геометрии графитсодержащих зон и слоев может быть использовано для объемного картирования структуры Приольхонья методами геоэлектрики.

Ранее [1] описаны и обсуждаются результаты региональных электроразведочных исследований в Приольхонье. При измерении потенциала ЕП вдоль региональных профилей шаг съемки составлял 25-50 м. Для зондирования методом переходных процессов использовались генераторные петли с длиной стороны 200 и более метров. В настоящей статье обсуждаются результаты детальных съемок методами ЕП, магниторазведки и зондирования методом переходных процессов в пади Барун-Хал. Выявленные в ходе этих съемок аномалии интересны в качестве «типичных» для проектирования дальнейших исследований, а также в связи с вопросами, которые возникают при их геологической интерпретации.

Участок работ и результаты съемки

Падь Барун-Хал находится в Приольхонье, в окрестностях пос. Черноруд (рис. 1). В километре к северо-западу от ее устья расположена база учебных геолого-геофизических практик ИрНИТУ. Борта пади сложены породами Ольхонского метаморфического комплекса: мраморами, кальцифирами, гнейсами, пироксеново-карбонатными кристаллическими сланцами, кварцитами, амфиболитами и мигматитами [2]. Падь представляет собой долину с плоским дном, образованным верхней границей осадочных отложений толщиной от долей метра вблизи северо-восточного борта пади до десяти и более метров у ее юго-западного борта. На рис. 1 показаны геофизические профили, вдоль которых были выполнены измерения магнитного и естественного электрического полей.



Рис. 1. Падь Барун-Хал, база учебных геолого-геофизических практик ИрНИТУ и геофизические профили: 1 – место на профиле, где наблюдается отрицательная аномалия ЕП большой амплитуды и положительная магнитная аномалия; 2 – положение центра установки зондирования методом переходных процессов

Съемка методом ЕП выполнена способом потенциала с помощью прибора АЭ72 и Cu-CuSO_4 электродов. На обоих профилях в качестве референтной, принималась крайняя северо-западная точка. Для измерения модуля T полного вектора геомагнитного поля использовался протонный магнитометр ММП 203. Расстояние между соседними точками измерений на профиле 1 составляло 5 м, на профиле 2-10 м.

Результаты измерений показаны на рис. 2 и 3. На обоих профилях обнаружены отрицательные аномалии потенциала ЕП большой амплитуды. Обычно такие аномалии создаются крутопадающими электронными проводниками в ионно-проводящих вмещающих породах [6]. Самая интенсивная аномалия на профиле 1 наблюдается в интервале профиля 550-750 метров. Ее амплитуда не менее 500 мВ, ширина на уровне полумаксимума ≈ 70 метров. Еще более интенсивная отрицательная аномалия с амплитудой 800 мВ и шириной около 40 м зарегистрирована на СЗ фланге профиля 2.

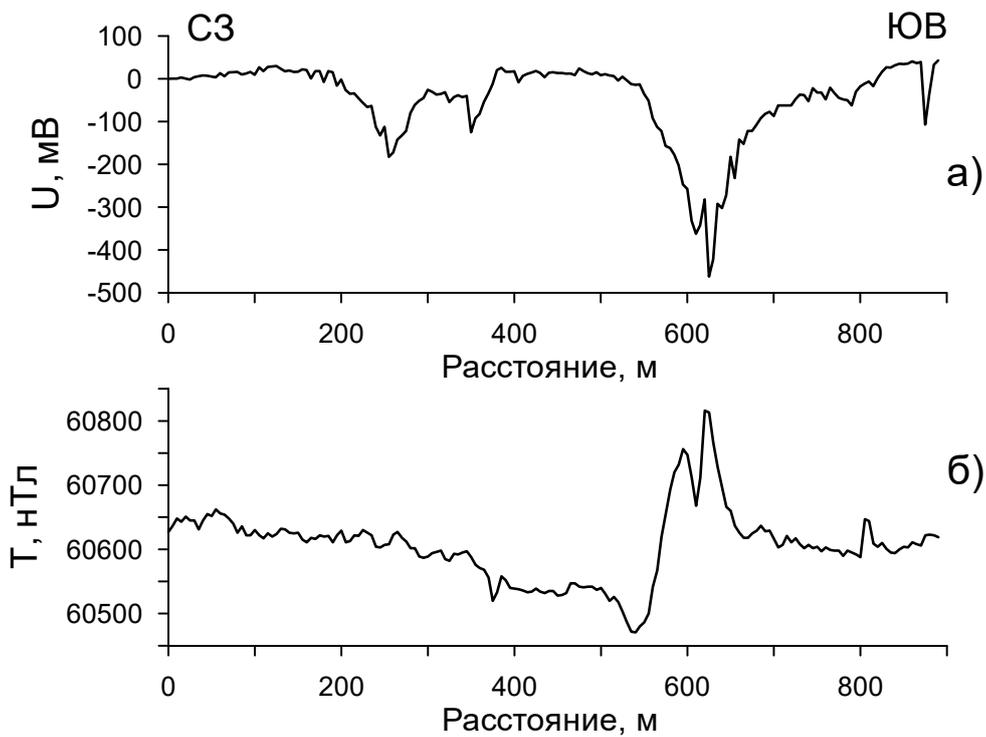


Рис. 2. Графики потенциала естественного электрического (а) и магнитного (б) полей по профилю 1

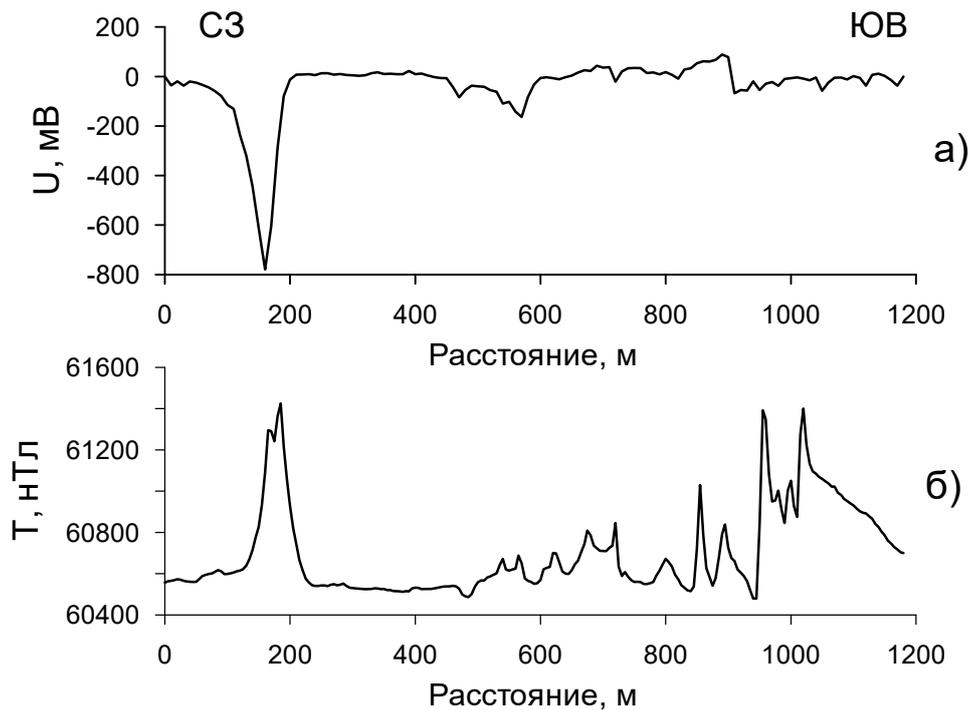


Рис. 3. Графики потенциала естественного электрического (а) и магнитного (б) полей по профилю 2

Результаты магнитной съемки иллюстрируют графики T на рис. 2б и рис. 3б. Как видно, на тех же интервалах профилей, где измерены интенсивные отрицательные аномалии ЕП, наблюдаются положительные аномалии магнитного

поля. Амплитуда аномалии Т на профиле 1 оценивается величиной порядка 200-300 нТл, на профиле 2 – около 800 нТл. Ширина обеих аномалий потенциала ЕП близка к ширине соответствующих аномалий магнитного поля.

Участок работ в пади Барун-Хал находится в Чернорудской, или Чернорудско-Баракчинской тектонической зоне [3], которая характеризуется интенсивными отрицательными аномалиями ЕП [1]. По результатам ЗСБ здесь на глубинах 100-400 м обнаружены породы с низкими (от единиц до первых десятков Ом·м) удельными электрическими сопротивлениями [1]. Как уже отмечалось, для работ методом ЗСБ использовалась установка «петля в петле» с генераторной петлей размером 200 м × 200 м. Такая установка обеспечивала необходимую глубину исследований, однако детальность изучения аномалий электропроводности оставляла желать лучшего.

Рис. 4 показаны результаты зондирования методом переходных процессов рядом с аномалией ЕП на профиле 2 (см. рис. 1). Измерения выполнены аппаратурой FastSnap с помощью комбинированной установки, включавшей генераторную петлю размером 50 м × 50 м (на рис. 1 ее центр показан маленьким крестиком) и пять приемных петель размером 10 м × 10 м. Одна из них располагалась в центре генераторной петли (соосная установка), а остальные – на расстоянии 50 м от ее центра (установки с разнесенными петлями).

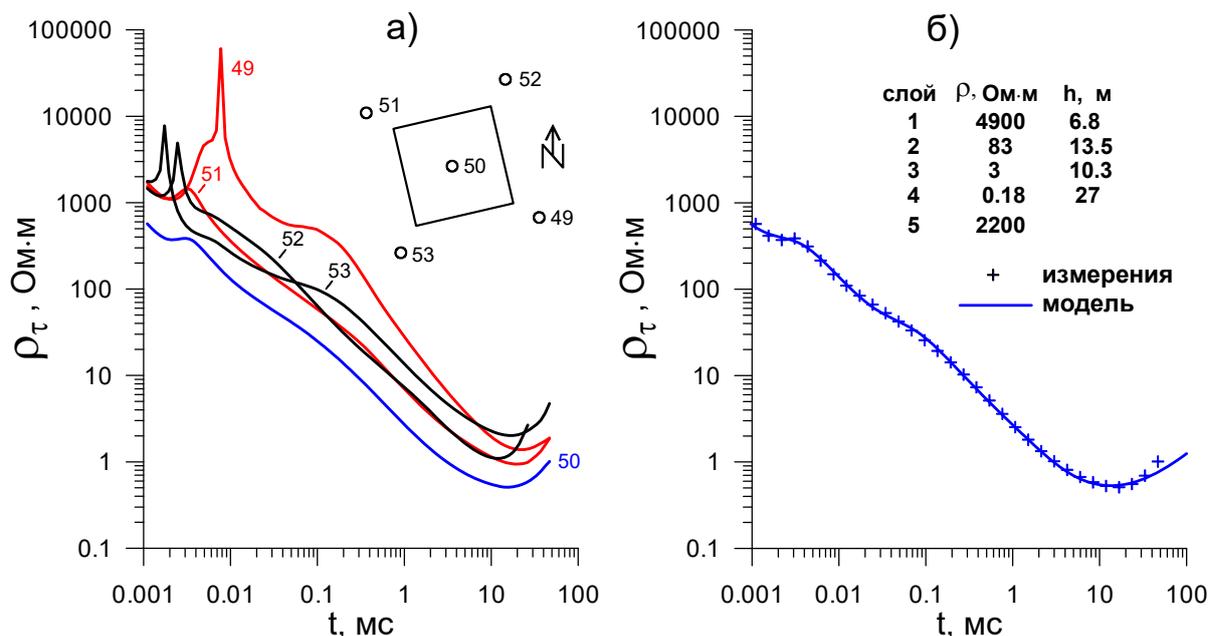


Рис. 4. Кривые кажущегося удельного сопротивления, измеренные рядом с аномалией ЕП на профиле 2 (а), и результаты интерпретации для соосной установки (б). Размер генераторной петли 50 м × 50 м

Хотя кривые ρ_τ на рис. 4а отличаются одна от другой, все они указывают на то, что под высокоомными породами находятся породы с очень низким удельным электрическим сопротивлением. Сильная зависимость кривых ρ_τ от разноса

и положения приемной петли свидетельствует о том, что геологическая среда на участке зондирований является электрически неоднородной и/или анизотропной. Сравнение кривых ρ_{τ} для разнесенных установок указывает на то, что удельное электрическое сопротивление сильнее всего изменяется в направлении СЗ-ЮВ, вкрест преобладающего простирания геологических структур. По простиранию, в направлении СВ-ЮЗ, разница между кривыми ρ_{τ} для разнесенных установок не так значительна.

Геоэлектрическая среда в месте, где выполнялось зондирование, является трехмерной, однако локально она может быть представлена горизонтально-слоистой с проводящим промежуточным слоем или основанием. Для таких геоэлектрических моделей глубина до кровли проводника и его удельное электрическое сопротивление, определенная посредством одномерной инверсии кривой ρ_{τ} для симметричной (соосной) установки, близки к истинным [8]. Под «истинной» данным случае понимается глубина, на которой находится верхняя граница проводящих пород под центром генераторной петли. Как показала интерпретация кривой ρ_{τ} для симметричной установки (рис. 4б), кровля проводника под центром генераторной петли находится на глубине 31-32 м, а его удельное электрическое сопротивление не превышает 0.2 Ом×м.

Обсуждение результатов

Приступая к обсуждению представленных выше результатов геофизических съемок, прежде сего необходимо ответить на вопрос о природе описанных выше аномалий. Как известно [1], в Приольхонье, как и во многих других местах [6], высокоамплитудные отрицательные аномалии потенциала естественного электрического поля наблюдаются над содержащими графит крутопадающими зонами, которые характеризуются низкими (порядка 0.1-1 Ом×м) значениями удельного электрического сопротивления. Это свидетельствует о том, что графит в таких зонах образует электрически-связанные системы. Композиция в виде ионно-проводящих пород, вмещающих крутопадающие проводники с электронной проводимостью, образуют природный гальванический элемент, или геобатарею. В Приольхонье прямым подтверждением связи аномалий ЕП с графитом являются результаты геофизических съемок на профиле через Кучулгинское месторождение графита [4], которое, как и участок съемки в пади Барун-Хал, находится в Чернорудской зоне. Графики потенциала ЕП и магнитного поля вдоль профиля на Кучулгинском месторождении представлены на рис. 5.

Таким образом, установлено следующее: 1) отрицательные аномалии ЕП наблюдаются над крутопадающими зонами/породами, содержащими графит в виде электрически-связанных систем; 2) над этими же породами наблюдаются положительные аномалии магнитного поля. Как можно видеть на рис. 2, 3, 5, между аномалиями магнитного и естественного электрического полей существует сильная корреляция: графики U и T зеркально отражают друг друга. Что может быть причиной такой корреляции?

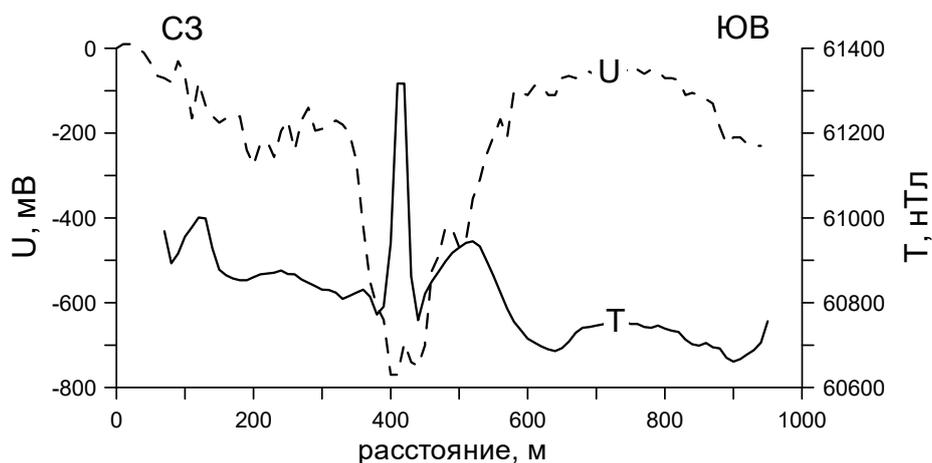


Рис. 5. Графики потенциала ЕП и магнитного поля по профилю через Кучулгинское месторождение графита. Измерения выполнены с шагом 10 м

В поисках объяснения мы обратили внимание на работу [7], в которой обсуждается осаждение графита из магматических флюидов. В остывающих породах, содержащих титаномагнетит, в качестве одного из способа образования графита рассматривается следующая реакция:



где CO_2 выделяется из магматического флюида.

Одним из продуктов реакции является магнетит, вследствие чего обогащенные графитом породы имеют повышенную магнитную восприимчивость и являются источником положительных магнитных аномалий.

Как показано в [3], изотопный состав углерода графитов Чернорудской тектонической зоны свидетельствует о ее глубинном заложении. Эта структура на протяжении около 100 млн лет в интервале от 500-450 до 370-350 млн лет назад служила проводником для обогащенных CO_2 глубинных флюидов, в результате восстановления которых образовались содержащие графит углеродистые тектониты.

По сравнению с вмещающими породами обогащенные графитом крутопадающие зоны характеризуются пониженным модулем сдвига [9]. Поэтому под действием напряжений сдвига именно вдоль этих зон происходили наиболее интенсивные дислокации.

Заключение

Как показали детальные геофизические съемки в пади Барун-Хал, крутопадающие зоны с электрически-связанной графитовой минерализацией отмечаются интенсивными отрицательными аномалиями естественного электрического поля, положительными аномалиями магнитного поля и очень низкими удельными электрическими сопротивлениями.

Вероятное объяснение корреляции аномалий ЕП и магнитного поля состоит в том, что при взаимодействии содержащих CO_2 флюидов с проницаемыми породами в последних отлагались графит и магнетит.

Графитовая минерализация контролировала локализацию деформаций в проницаемых породах Чернорудской зоны и, таким образом, влияла на ее строение и эволюцию.

Применение геофизических методов, в первую очередь метода естественного электрического поля, открывает перспективы для изучения древних путей миграции глубинных флюидов и, тем самым, геологической истории Приольхонья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников Н. О., Бигалке Ю., Кожевников О. К. Региональная структура Приольхонья по данным геоэлектрических исследований // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 2. – С. 253-265.

2. Кочнев А. П. Ольхонский кристаллический комплекс. Проблемы геологии и минерализации Приольхонья: монография. – Иркутск : ИрГТУ, 2007. – 252 с.

3. Летников Ф. А., Савельева В. Б., Заири Н. М. Эндогенные процессы и графитовая минерализация в Чернорудско-Баракчинской тектонической зоне (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 3. – С. 661-666.

4. Солоненко В. П. Геология месторождений графита Восточной Сибири и Дальнего Востока. – М.: Государственное издательство геологической литературы, 1951. – 383 с.

5. Федоровский В. С., Скляр Е. В. Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические карты высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1. – № 4 – С. 331-418.

6. Bigalke J., Grabner E.W. The Geobattery model – a contribution to large scale electrochemistry // *Electrochimica Acta*. – 1997. – Vol. 42. – № 23-24. – P. 3443-3452.

7. Murphy B. S., Huizengac J. M., Bedrosiana P. A. Graphite as an electrically conductive indicator of ancient crustal-scale fluid flow within mineral systems // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2022. – Vol. 594. – P. 117700.

8. Newman G. A., Anderson W. L., Hohmann G. W. Interpretation of transient electromagnetic soundings over three-dimensional structures for the central loop configuration // *Geophysical Journal International*. – 1987. – Vol. 89. – № 3. – P. 889-914.

9. Oohashi K., Hirose T., Shimamoto T. 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*. – 2013. – Vol. 118. – № 5. – P. 2067-2084.

© Н. О. Кожевников, М. В. Шарлов, 2024