

УДК [550.837.311 + 550.837.81 + 550.838.3 + 550.838.4]

В.А. Куликов<sup>1</sup>, Н.В. Лубнина<sup>2</sup>, А.Ю. Паленов<sup>3</sup>, А.В. Соловьева<sup>4</sup>

## КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА АНОМАЛИИ «КОЗЛОВКА» (КАЛУЖСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Работа посвящена комплексным геофизическим исследованиям, выполненным для определения природы интенсивной магнитной аномалии, выявленной по результатам наземной съемки на правом берегу р. Слушка на территории Юхновского района Калужской области. Комплексная интерпретация геофизических данных и лабораторных измерений керна позволила уточнить природу и параметры аномалиеобразующего объекта, расположенного в верхней части разреза и представленного суглинками, содержащими такие магнитные минералы, как грейгит, пирротин и магнетит.

*Ключевые слова:* спектральная вызванная поляризация, магнитометрия, термомагнетометрия, озерно-болотные отложения.

This paper deals with the complex geophysical studies carried out to determine the nature of the intense magnetic anomaly identified by the results of ground surveys on the right bank of the river Slushka on the territory of Yuhnovsky district of Kaluga region. Integrated interpretation of geophysical data and laboratory core measurements allowed to define the nature and parameters of the anomalous object located in the upper part of the section and presented by loam containing such magnetic minerals as greigite, pyrrhotite and magnetite.

*Key words:* spectral induced polarization, magnetometry, thermomagnetic susceptibility measurements, lacustrine-swamp deposits.

**Введение.** В рамках проведения учебно-научных практик со студентами кафедры геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на территории Калужской области была изучена локальная магнитная аномалия «Козловка», выявленная по результатам рекогносцировочных работ вблизи д. Козловка на правом берегу р. Слушка (рис. 1).

В геологическом отношении аномалия «Козловка» приурочена к зоне развития реликтов миоценовых палеорусловых отложений.

В течение учебной геофизической практики 2016 г. проведено детальное исследование обнаруженной аномалии методами наземной магниторазведки, вертикального электрического зондирования и спектральной вызванной поляризации (ВЭЗ-СВП). Зимой 2017 г. в рамках научно-экспериментальной зимней практики по одному из профилей ВЭЗ-СВП выполнены сейсморазведочные работы методами ОГТ и МПВ и пробурены две разведочные скважины с последующим измерением физических свойств керна.

**Результаты магнитометрии.** Площадная магнитная съемка выполнена по регулярной сети профилей северо-восточного простирания с шагом по профилю 5 м и расстоянием между профилями 10 м. Измерения магнитного поля осуществлялись

с использованием магнитометров ММПОС-1. Первичная обработка данных заключалась в учете вариаций геомагнитного поля и введении поправки за вековой ход вариаций. Параметры нормального магнитного поля вычислялись по модели IGRF11 и составили для участка работ: склонение восточное 9,3°, наклонение 71,5°, модуль вектора магнитного поля 51201 нТл. Эти параметры нормального поля использовали при дальнейшем решении обратной задачи магниторазведки.

По результатам площадной съемки выявлено несколько локальных положительных магнитных аномалий, положение которых показано на рис. 2. Наиболее интенсивная аномалия выявлена в северо-восточной части площади работ, ее амплитуда достигает 100 нТл, в южной части планшета установлена аномалия интенсивностью 60–70 нТл. Линейные размеры аномалий  $\Delta T_a$  составляют несколько десятков — несколько сотен метров.

**Результаты электроразведочных работ методом ВЭЗ-СВП.** На втором этапе работ выполнены измерения методом ВЭЗ-СВП по профилю № 1 длиной 120 м (рис. 2), пересекающему северо-западный край южной магнитной аномалии. Выбор профиля работ обусловлен несколькими причинами, главная из которых — высокие значения сопротивления заземления на всем изучаемом

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* vic@nw-geophysics.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* natalia.lubnina@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, ассистент; *e-mail:* palenov@mail.ru

<sup>4</sup> ООО «Северо-Запад», геофизик, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* solovieva@nw-geophysics.ru

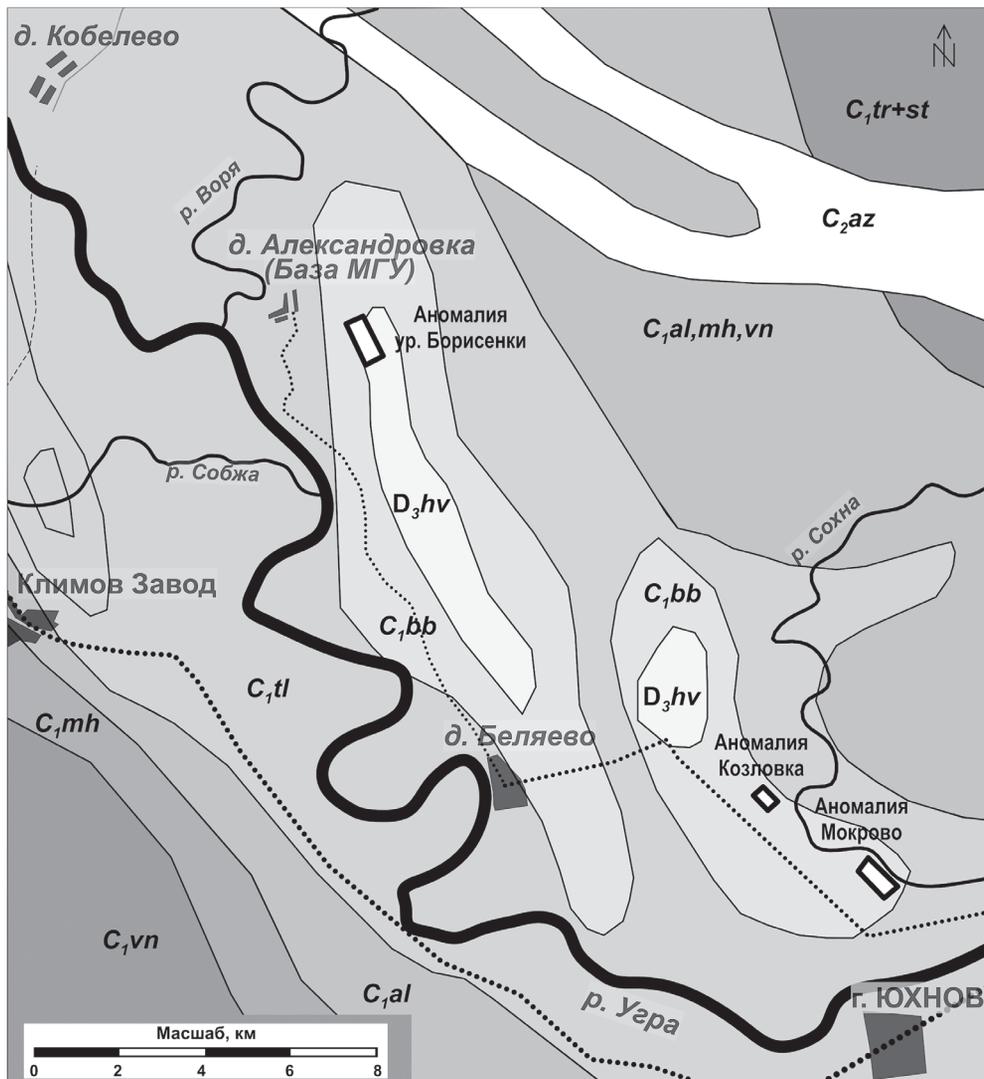


Рис. 1. Расположение магнитных аномалий в районе полигона «Александровка» на фоне геологической карты домезозойских отложений, по [Бобров, 2007]

участке работ. Низких значений переходного сопротивления можно добиться только при расположении установки вдоль лесных дорог или просек.

При проведении полевых работ методом ВЭЗ-СВП использовали многоканальный измеритель вызванной поляризации «ИМВП-8» и электро-разведочный генератор «АСТРА-100» (ООО «Северо-Запад», Москва). Измерения проводилась с использованием симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже со специально подобранными разносами. Диапазон разносов  $AB/2 = 3 \div 105$  м, длина приемных линий MN 2 и 14 м. Измерения проведены в интервале частот от 0,15 до 39 Гц.

Для определения вызванной поляризации применяли методику фазово-частотных измерений [Куликов, Зорин и др., 2013]. Кажущаяся поляризуемость ( $\eta_k^{ДФП}$ ) рассчитывалась через дифференциальный фазовый параметр (ДФП) по приближенной формуле:  $\eta_k^{ДФП} = -2,5 \cdot ДФП$ .

На рис. 3 представлены псевдорезы кажущегося сопротивления, кажущейся поляризу-

емости на частотах 0,15 и 9,76 Гц, а также разрез разности кажущейся поляризуемости  $\Delta\eta_k^{ДФП}$  на этих частотах. Над разрезами приведен график аномального магнитного поля.

На первых разносах высокие значения кажущегося сопротивления коррелируют с высокими значениями кажущейся поляризуемости на частоте 19 Гц. Разностный параметр  $\Delta\eta_k^{ДФП}$  характеризуется отрицательными значениями (рис. 3, д), что свидетельствует о высокой скорости спада поля вызванной поляризации (ВП) в приповерхностной части разреза [Куликов, Зорин и др., 2013]. Такое соотношение параметров можно объяснить влиянием сухих песков зоны аэрации, в которых высокая интенсивность процессов ВП обусловлена токами смещения.

В северной части профиля, по мере увеличения глубинности исследований, высокочастотная аномалия кажущейся поляризуемости сменяется низкочастотной, она максимально проявлена на частоте 0,15 Гц на разносе 10 м (рис. 3, б). Разностный параметр  $\Delta\eta_k^{ДФП}$  характеризуется поло-

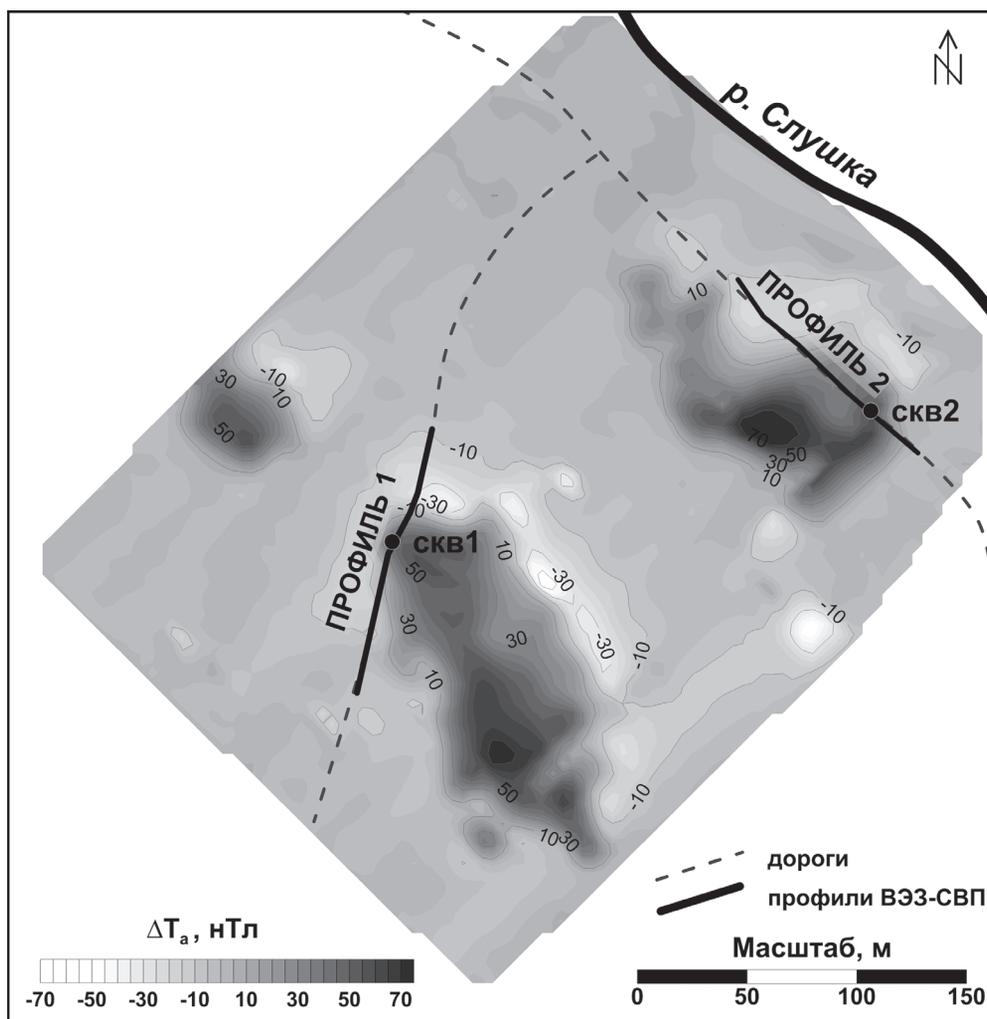


Рис. 2. Карта аномального магнитного поля

жительными значениями 0,3–0,6% (рис. 3, д). Эта аномалия может быть связана с зоной частичного водонасыщения в обводненных песках.

На разносах 15–60 м в центре профиля фиксируется еще одна аномалия кажущейся поляризуемости (до 3%) на высоких частотах при значениях разностного параметра  $\Delta\eta_k^{ДФП}$  от  $-0,6$  до  $-0,8\%$  (рис. 3, д). Центр этой высокочастотной аномалии пространственно совпадает с максимумом аномального магнитного поля. Это позволяет предположить, что причиной этой аномалии могут быть магнетитсодержащие отложения озерно-болотного типа, которые были изучены на аналогичных объектах «Борисенки» и «Мокрово» [Куликов, Бобачев и др., 2014, 2016].

**Инверсия данных ВЭЗ-СВП.** Двумерная инверсия данных ВЭЗ-СВП выполнена в программе ZondRes2D (автор А.Е. Каминский) с подбором параметров модели Cole-Cole [Pelton, 1983]. По результатам инверсии построены глубинные модели (рис. 4) удельного электрического сопротивления  $\rho$  (УЭС), поляризуемости  $m$  и  $\tau$  — временного параметра ВП. Двумерный подбор аномального магнитного поля выполнен в программе ZondRes2D на основе поляризационной модели.

В центральной части профиля на глубине 14–15 м выделяется слой, обладающий аномальными электрическими и магнитными свойствами. Мощность слоя по результатам инверсии составляет около 5 м, однако в реальности она может быть меньше.

Разведочной скважиной № 1 (рис. 2) в этом интервале глубины вскрыт горизонт глин, которые по результатам капаметрии керна характеризуются высокими значениями магнитной восприимчивости. К сожалению, по ряду объективных причин выход керна в скважине № 1 был низкий, границы геологических слоев определены с большой погрешностью, провести скважинные геофизические измерения не удалось.

Горизонт глин характеризуется пониженными значениями удельного электрического сопротивления (50 Ом·м), высокой поляризуемостью (2,5%), низкими значениями временного параметра ВП (несколько десятков миллисекунд), высокими значениями магнитной восприимчивости ( $50 \div 200 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ). Аналогичные параметры получены ранее для горизонтов глин на аномалиях «Мокрово» и «Борисенки» [Куликов, Бобачев и др., 2014, 2016]. Минимальные значения УЭС

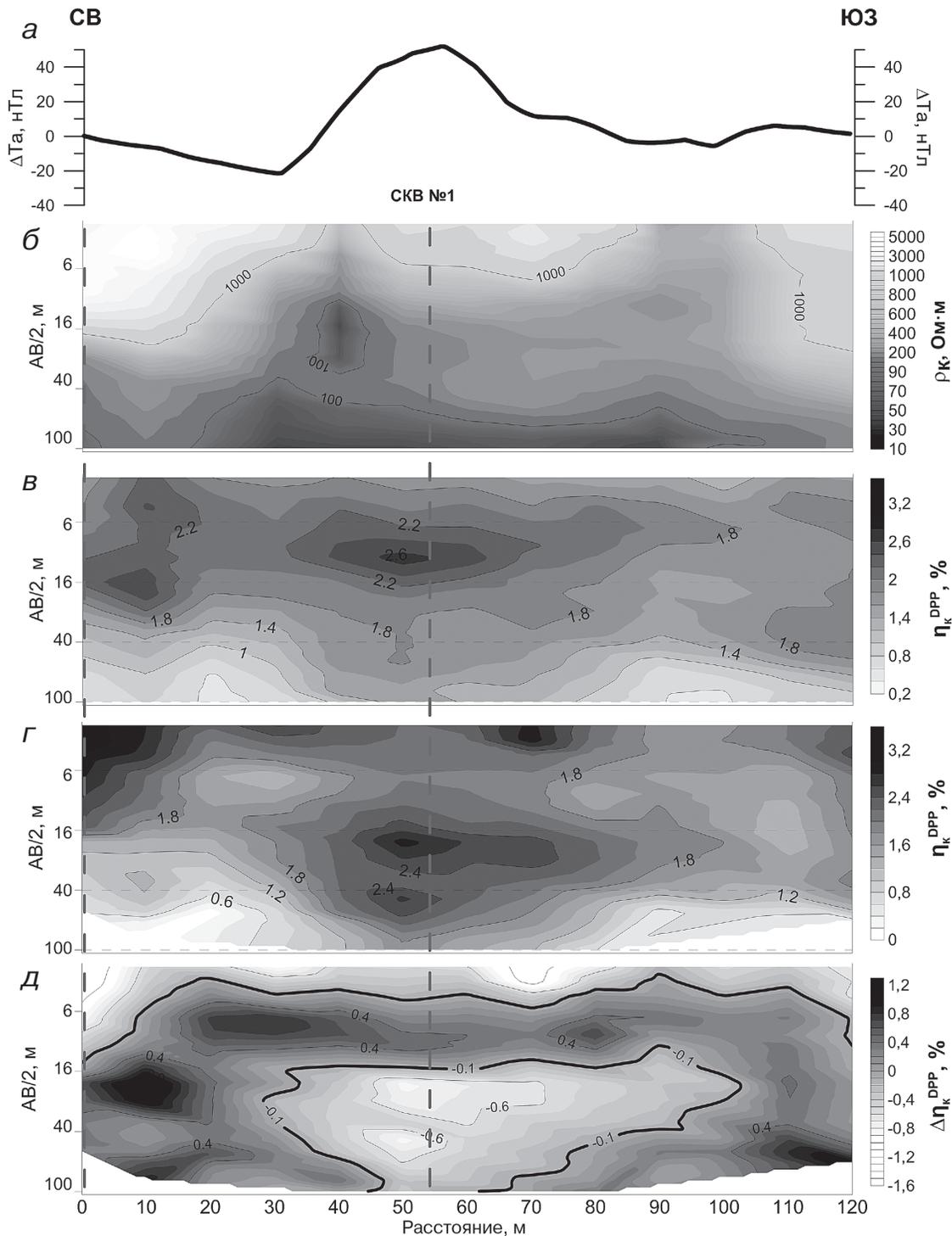


Рис. 3. График аномального магнитного поля (а) и псевдоразрезы кажущегося сопротивления  $\rho_k$  (б), кажущейся поляризуемости  $\eta_k^{\text{ДФП}}$  на частоте 0,15 Гц (в) и 9 Гц (г), разницы кажущейся поляризуемости  $\Delta\eta_k^{\text{ДФП}}$  (0,15–9 Гц) по профилю № 1 (д)

и максимальные значения магнитной восприимчивости фиксируются на дистанциях по профилю 30–60 м и совпадают с максимумом  $\Delta T_a$ . Продолжение горизонта в южной части профиля (60–110 м) в основном связано с боковым влиянием, возникающим в связи с пространственным положением профиля относительно аномалиеобразующего объекта (рис. 2).

Высокие значения УЭС в приповерхностной части разреза отвечают пескам, мощность которых

по результатам бурения составляет 7,5 м. Нижняя часть песков обводнена, над уровнем грунтовых вод (УГВ) существует зона частичного водонасыщения, которая проявляется на поляризационной модели в повышенных значениях параметров  $m$  и  $\tau$  на абсолютных отметках около 150 м.

**Природа аномальных магнитных и поляризационных свойств глин.** Для определения минерального состава образцов магнитных пород, отобранных при бурении, была выполнена тер-

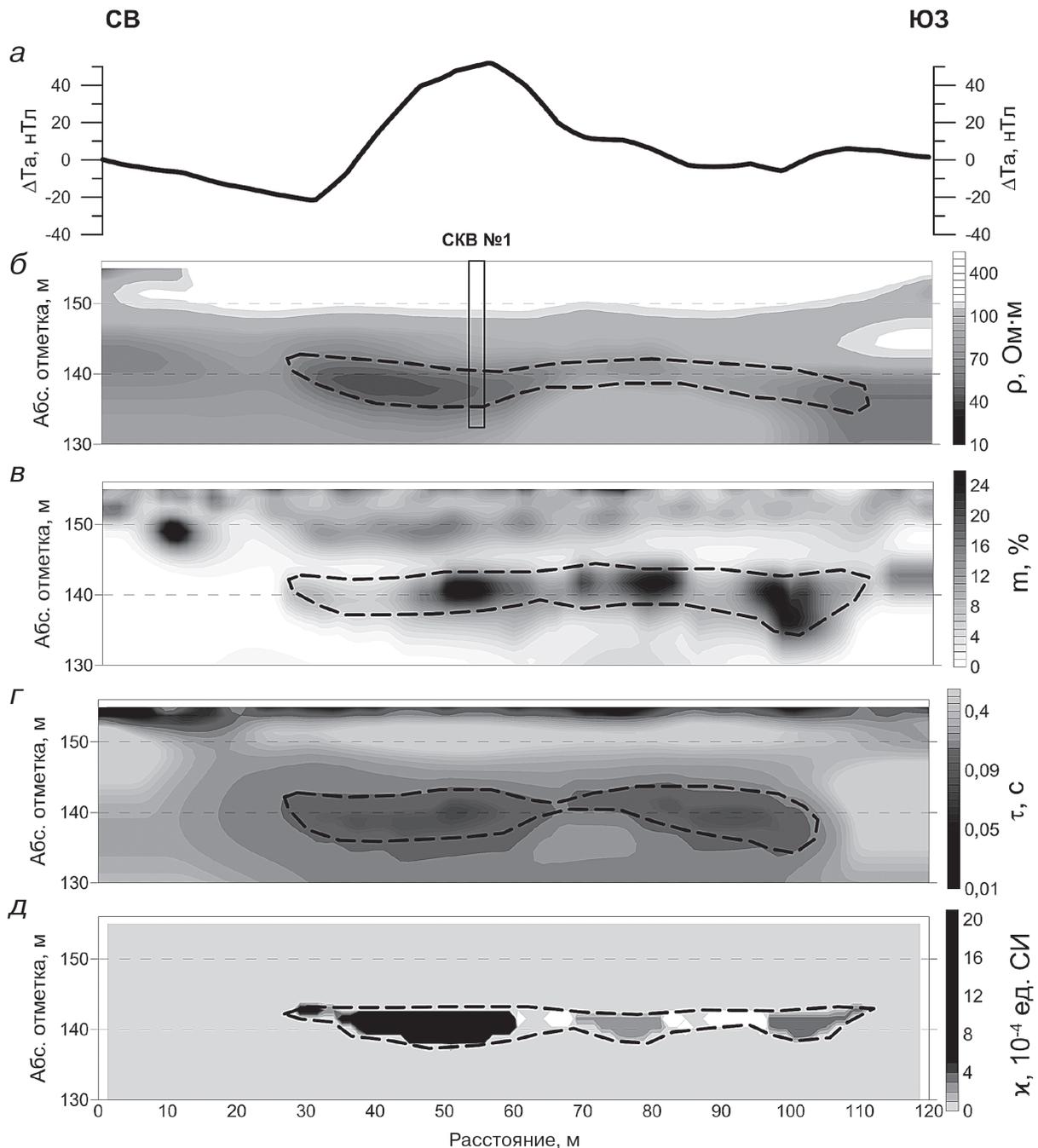


Рис. 4. Результаты интерпретации данных электроразведки и магниторазведки. График аномального магнитного поля (а), модель УЭС (б), модель поляризуемости (в), модель временного параметра ВП (г), модель магнитной восприимчивости (д)

мокаппаметрия — исследование магнитной восприимчивости (МВ) при непрерывном нагреве, это чувствительный метод диагностики магнитных и некоторых железосодержащих минералов, включая сульфиды железа — пирит, арсенопирит, пирротин, грейгит и т.д.

Исследования магнитной восприимчивости при высоких значениях температуры проводились в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на многофункциональном каппаметре «KLY-4S» с термоприставкой CS-3 («AGICO Ltd.»). Образцы нагревали до 700 °С с последующим охлаждением

до комнатной температуры со скоростью нагрева и остывания 11 °С/мин.

В исследовании участвовали магнитные образцы, отобранные из скважины № 1 на аномалии «Козловка», а также образцы, отобранные ранее на схожей по строению аномалии «Мокрово» (рис. 1) [Куликов, Бобачев и др., 2016].

На аномалии «Козловка» все образцы отобраны из горизонта глин–суглинков с глубины 15–15,5 м, характеризующегося высокими значениями магнитной восприимчивости (по каппаметрии зерна). На аномалии «Мокрово» исследованы образцы, отобранные из горизонта магнитных

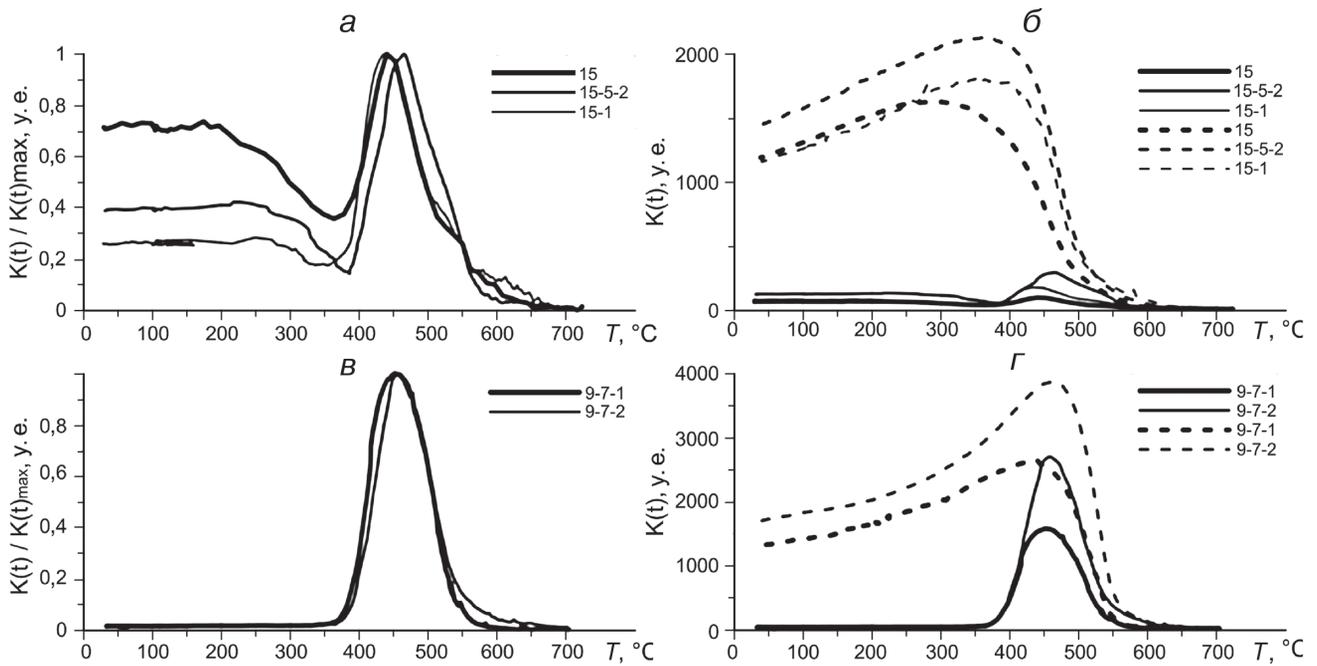


Рис. 5. Аномалия «Мокрово». Температурные зависимости магнитной восприимчивости: *а, в* — кривые нагрева; *б, г* — кривые нагрева (сплошная линия) и охлаждения (пунктирная линия)

глин с глубины 15 м, а также несколько образцов суглинков с глубины 10 м.

На рис. 5, *а* приведены кривые нагрева образцов из магнитного и поляризующегося горизонта глин аномалии «Мокрово» (глубина 15–16 м). Для удобства сравнения образцов с разным уровнем магнитных свойств значения магнитной восприимчивости нормировались на максимальное значение  $k(T)$  для каждого образца. На рис. 5, *б* графики нагрева и охлаждения для этих же образцов показаны на одном бланке без нормировки.

Характер кривых нагрева позволяет предположить присутствие в глинах грейгита. Грейгит ( $F_3S_4$ ) — сульфидный аналог магнетита [Skinner et al., 1964], широко распространен в осадочных породах, обогащенных органическим веществом. Встречается в озерных глинистых отложениях, ленточных глинах, богатых сульфидами. Грейгит устойчив при температуре ниже  $+180...+200$  °С, сильномагнитен [Бабанин, Трухин, 1998].

Грейгит и магнетит в пресноводных водоемах синтезируются магнитотактическими бактериями. Такие бактерии существуют в водной среде в условиях достаточно резкой окислительно-восстановительной границы (ОВГ) и именно вблизи этой границы [Лубнина, Бычков, 2015; Корп, Kirschvink, 2008]. Бактерии-производители кристаллов магнетита могут жить несколько выше границы окислительной и восстановительной зон (ОВЗ). Ниже этой границы живут магнитотактические бактерии, производящие грейгит [Нурғалиев и др., 2009].

Для кривых нагрева грейгита характерно снижение магнитной восприимчивости при тем-

пературе 350–420 °С, что связано с его разрушением. При дальнейшем увеличении температуры наблюдается максимум, связанный с образованием устойчивого к нагревам магнитного минерала, предположительно магнетита. Кривые остывания лежат, как правило, выше кривых нагрева [Минюк, Тюкова и др., 2013].

На аномалии «Мокрово» было отобрано несколько образцов из горизонта суглинков на глубине 10 м. Эти образцы слабомагнитны, но характеризуются высокими значениями электрической поляризуемости [Куликов, Бобачев и др., 2016]. Кроме того, по результатам рентгенофлуоресцентного анализа в этом интервале отмечено высокое содержание железа (6%). Кривые нагрева этих образцов имеют вид, характерный для пирита и арсенопирита (рис. 5, *в*). Однако для пирита на кривых остывания при температуре  $\sim 320$  °С должен наблюдаться резкий пирротинный пик, свидетельствующий об образовании моноклинного пирротина [Wang et al., 2008]. Для арсенопирита перегиб, связанный с образованием моноклинного пирротина, может вообще отсутствовать или быть малозаметен [Минюк, Тюкова и др., 2013]. О присутствии в породе арсенопирита свидетельствует также смещение максимума МВ в область более высокой температуры на кривых остывания, что связано с образованием катион-дефицитного магнетита (рис. 5, *г*).

Интенсивный магнетитовый пик (увеличение МВ после прогрева в 100 раз) позволяет предположить, что здесь мы имеем дело с зернами сульфидов микроскопического размера, так как фрам-

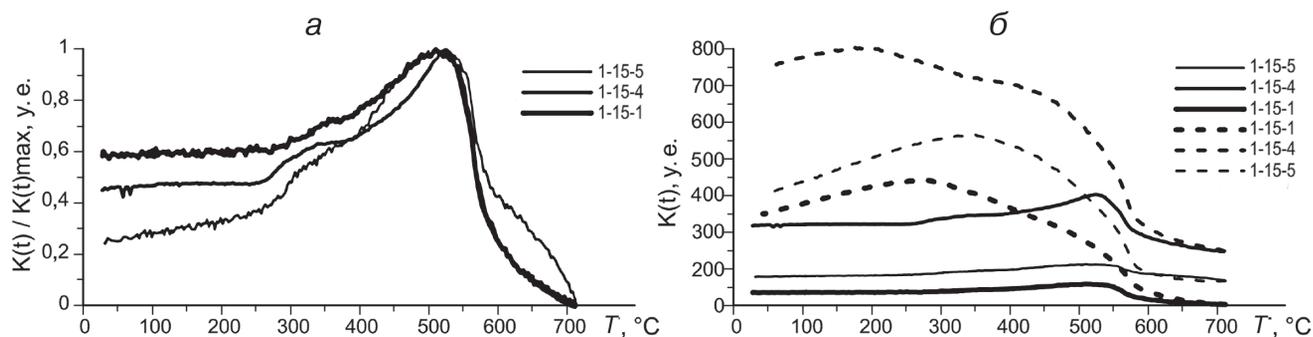


Рис. 6. Аномалия «Козловка». Температурные зависимости магнитной восприимчивости: а — кривые нагрева; б — кривые нагрева (сплошная линия) и охлаждения (пунктирная линия)

боидальный пирит, широко распространенный в осадках, интенсивнее подвержен температурным превращениям, чем крупнокристаллический пирит [Ferrow, Sjoberg, 2005; Wilkin, Barnes, 2007].

Судя по характеру кривых нагрева и остывания образцов из магнитного горизонта аномалии «Козловка», в породах присутствует смесь моноклинного и гексагонального пирротина.

На кривой нагрева начиная с температуры 230–260 °С наблюдается первый резкий рост магнитной восприимчивости (рис. 6, а), обусловленный переходом гексагонального пирротина в ферримагнитное состояние ( $\lambda$ -переход). После температуры 300 °С происходит небольшое замедление роста МВ, которое связано с точкой Кюри этой фазы. При температуре 500 °С наблюдается магнетитовый пик. Наличие пирротина подтверждается также максимумами на кривых остывания при температуре 200–280 °С (рис. 6, б).

**Закключение.** Результаты интерпретации геофизических материалов, данные бурения и лабораторные анализы керн показали, что аномалии связаны с горизонтами озерно-болотных глин и

суглинков, залегающих на глубине 15–20 м от поверхности земли.

Повышенная намагниченность объясняется присутствием в породах магнитных минералов — грейгита, пирротина, магнетита. В вышележащих отложениях возможно присутствие пирита и арсенопирита. Наличие сульфидов объясняет повышенную электрическую поляризуемость пород.

Грейгит и магнетит в озерных отложениях могут образовываться, в том числе, за счет деятельности магнитотактических бактерий. Фрамбоидальные агрегаты пирита формируются в пресных водоемах в условиях интенсивного поступления органического вещества и широко распространены в голоценовых озерных осадках.

Размеры магнитных и электропроводящих минералов — микроскопические. Они не обнаруживаются методом рентгенофазового анализа в кристаллической фазе. Косвенно этот вывод подтверждается большими магнетитовыми пиками при нагреве некоторых исследованных нами образцов. Микроскопическими размерами электропроводящих включений объясняется также высокая скорость вызванной поляризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Верховцева Н.В. и др. О биогенном происхождении магнетита и грейгита в осадках водоемов и почвах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1998. № 6. С. 36.  
 Бобров С.П. Геологический атлас Калужской области. Калуга: ООО ПГП «Притяжение», 2007. 70 с.  
 Куликов В.А., Бобачев А.А., Косоруков В.Л. и др. Результаты комплексных геофизических работ на аномалии «Мокрово» (Юхновский район, Калужская область) // Геофизика. 2016. № 2. С. 32–42.  
 Куликов В.А., Бобачев А.А., Модин И.Н. и др. Исследование неогеновой палеодолины на территории национального парка Угра // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 3. С. 54–60.  
 Куликов В.А., Зорин Н.И., Манжеева И.Т., Яковлев А.Г. Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра // Геофизика. 2013. № 6. С. 23–31.  
 Лубнина Н.В., Бычков А.Ю. Магнитотактические бактерии и биомагнетизм: критерии отбора образцов

для национального банка-депозитария живых систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 4. С. 49–52.  
 Минюк П.С., Тюкова Е.Э., Субботникова Т.В. и др. Термокаппаметрия природных сульфидов железа Северо-Востока России // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 4. С. 601–614.  
 Нургалиев Д.К., Утемов Э.В., Ясонов П.Г. и др. Остатки магнитотактических бактерий в отложениях современных озер — новый инструмент палеогеофизики // Уч. зап. КазГУ. Сер. Естественные науки. 2009. Т. 151. Кн. 4. 251 с.  
 Ferrow E.A., Sjoberg B.A. Oxidation of pyrite grains: a Mossbauer spectroscopy and mineral magnetism study // Hyperf. Int. 2005. Vol. 163. P. 95–108.  
 Kopp R.E., Kirschvink J.L. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria // Earth Sci. Rev. 2008. Vol. 86. P. 42–61.  
 Pelton W.H., Sill W.R., Smith B.D. Interpretation of complex resistivity and dielectric data // Geophys. Transactions. 1983. Vol. 29, N 4. P. 297–330.

*Skinner B.J., Erd R.C., Grimaldi F.S.* Greigite, the thio-spinel of iron; a new mineral // Amer. Miner. 1964. Vol. 49. P. 543–555.

*Wang L., Pan Y., Li J., Qin H.* Magnetic properties related to thermal treatment of pyrite // Sci. China. Ser. D: Earth Sci. 2008. Vol. 5 (8). P. 1144–1153.

*Wilkin R.T., Barnes H.L.* Formation processes of framboidal pyrite // Geochim. Et Cosmochim. Acta. 1997. Vol. 61. P. 323–339.

Поступила в редакцию  
18.06.2017