

Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых

УДК 550.837.6 + 550.379 + 550.8.053
DOI 10.21285/0130-108X-2016-57-4-9-18

ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ТИПА НЕСОГЛАСИЯ В ЗАБАЙКАЛЬСКОМ КРАЕ КОМПЛЕКСОМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

© Б.А. Путилов¹, А.И. Булнаев²

¹Иркутская межобластная ветеринарная лаборатория, Россия, 664005, Иркутск, ул. Боткина, 4.

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Открытие месторождения Миллениум в области кондуктора В1 в фундаменте бассейна Атабаска в Канаде подтолкнуло авторов к выявлению подобных объектов на территориях со схожим геологическим строением в России.

В результате комплексной интерпретации данных аэрогеофизических съемок, выполненных в западной части Березовского прогиба, авторами были выявлены ранее неизвестные проводящие структуры северо-западного простирания. Установлено, что эти структуры характеризуются вытянутыми в одном направлении линейными зонами повышенной электропроводности, знакопеременным вдоль простирания магнитным полем и малоинтенсивным полем гамма-излучения. В пределах одной из таких структур с помощью метода электромагнитного зондирования выявлена аномалия низкого удельного электрического сопротивления, обусловленная скоплением графита. В результате последующего бурения в пределах аномальной зоны было открыто Бухаровское рудопроявление урана с прогнозными запасами более 4 тыс. т. Расположенное в фундаменте ниже поверхности структурно-стратиграфического несогласия, в ксенолитах графитизированных сланцев, это рудопроявление никак не проявляет себя в физических полях, которые к тому же ощутимо искажены мозаикой наложенных друг на друга разрывных нарушений.

Сопоставление внутреннего строения зон проводимости с эталонными структурами бассейна Атабаска позволило выявить их принципиальное отличие. Структуры Березовского прогиба имеют ступенчатую морфологию и состоят из дискретных объектов при том, что, как известно, в бассейне Атабаска так называемые «Коридоры» вытянуты вдоль ярко выраженной в магнитном поле зоны разуплотнения пород между блоками Муджатик и Волластон. Это вновь открывшееся обстоятельство представляет, по мнению авторов, наиважнейший интерес для исследований.

Ключевые слова: уран, рудопроявление, несогласие, электромагнитное зондирование, удельное электрическое сопротивление, графит.

Формат цитирования: Путилов Б.А., Булнаев А.И. Поиски месторождений типа несогласия в Забайкальском крае комплексом геофизических методов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4 (57). С. 9–18. DOI 10.21285/0130-108X-2016-57-4-9-18.

¹Путилов Борис Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, специалист отдела экологического мониторинга и радиационного контроля, e-mail: borislav2410@gmail.com

Putilov Boris, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Expert of the Department of Environmental Monitoring and Radiation Control, e-mail: borislav2410@gmail.com

²Булнаев Андрей Иосифович, член-корреспондент Российской Академии естественных наук, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры технологии геологической разведки, e-mail: bulnaev@istu.edu

Bulnaev Andrey, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor of the Department of Technology of Geological Exploration, e-mail: bulnaev@istu.edu

EXPLORATION OF UNCONFORMITY-TYPE URANIUM DEPOSITS IN THE TRANS-BAIKAL TERRITORY BY THE COMPLEX OF GEOPHYSICAL METHODS

V.A. Putilov, A.I. Bulnaev

Irkutsk Interregional Veterinary Laboratory, 4 Botkin St., Irkutsk, 664005, Russia.

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The discovery of Millennium deposit in the conductor B1 in the basement of Athabasca Basin in Canada prompted the authors to try to identify such objects in Russia on the territories with the similar geological structure.

The integrated interpretations of the data of airborne geophysical surveys performed in the western part of the Berezovsky depression allowed to identify previously unknown conductive structures of north-western strike. It is determined that these structures are characterized with the elongated in one direction linear zones of increased electrical conductivity, an alternating along the strike magnetic field and a low-intensity field of gamma radiation. An anomaly of low electrical resistivity caused by graphite accumulation is found within one of these structures by the method of EM sounding. Subsequent drilling within the anomalous zone resulted in the discovery of the Bukharovskoe uranium occurrence with forecast reserves of more than 4 thousand tonnes. This ore occurrence located in the basement below the surface of the structural and stratigraphic unconformity, in the xenoliths of graphitic schists does not manifest itself in the physical fields significantly distorted by the mosaic of superimposed faults.

Comparison of the internal structure of conductivity zones with the reference structures of the Athabasca Basin has revealed their fundamental differences. Berezovsky depression structures have a stepped morphology and consist of discrete objects, whereas it is well known that the so-called "corridors" in the Athabasca basin are extended along the strongly marked in the magnetic field decompression zone between the tectonic regions of Mudjatik and Wollaston. According to the authors, this newly discovered fact is of an overriding interest for researches.

Keywords: uranium, ore occurrence, unconformity, electromagnetic sounding (EM sounding), electrical resistivity, graphite

For citation: Putilov V.A., Bulnaev A.I. Exploration of unconformity-type uranium deposits in the Trans-Baikal territory by the complex of geophysical methods. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016. No. 4 (57). Pp. 9–18. DOI 10.21285/0130-108X-2016-57-4-9-18.

Введение

Березовский прогиб (рис. 1) находится на границе Забайкальского края, Иркутской области и республики Саха (Якутия). Известно, что этот район имеет схожее геологическое с районом Атабаска в Канаде строение и возможность обнаружения здесь месторождений урана типа «несогласия» (структурно-стратиграфического несогласия (ССН)) неоднократно отмечалась исследователями [1, 2]. Анализируя геолого-геофизические материалы предшественников и результаты собственных исследований, авторы статьи пришли к выводу о существовании на территории Березовского прогиба рудоконтролирующих проводящих структур, подобных «кондукторам» в породах бассейна Атабаска [3, 4].

В тектоническом отношении площадь исследований располагается на стыке трех крупных геотектонических

структур: Нечерского поднятия раннепротерозойских гранит-метаморфических комплексов Байкальской складчатой области, западной части Чарской глыбы архейского возраста, представленной Ничатским гранито-гнейсовым куполом, и Березовским перикратонным прогибом Сибирской платформы, выполненным венд-рифейскими осадками [5]. В структурном плане площадь представлена региональными, долгоживущими зонами разломов северо-западного (Ченчинский и Ствотах-Юсюряхский), северо-восточного (Атбастах-Торгойский) и субмеридионального (Жуинский) направлений. Последний является границей, отделяющей Чарскую глыбу от Байкальской складчатой области.

Разрез толщи имеет двухъярусное строение. Фундамент в целом представлен гранитами с различной степенью насыщенности ксенолитами кристалло-



Рис. 1. Схема расположения детальных участков и комплексных профилей южной части Ничатской площади (по материалам ОАО «Сосновгео»):
 1 – Деканда; 2 – Мигматитовый; 3 – Богаюктинский; 4 – Новый; 5 – Джелинда.
 Заштрихованная область – граница ССН

сланцев. Среди последних преобладают мелкозернистые сланцы биотит-кварц-полевошпатового состава с вариациями породообразующих минералов в различных количественных соотношениях.

Рифейский осадочный чехол представлен чередованием красноцветных песчаников, алевролитов с прерывистым маломощным базальным горизонтом гравелитов [5].

Материалы и методы исследования

В рамках проекта «Поисковые работы в западной части Березовского прогиба» в 2007–2010 гг. была детально изучена граница структурно-стратиграфического венд-рифейского несогласия с целью выявления проводящих объектов и оценки их перспективности. Методы исследований включали полевые геолого-геофизические работы и камеральную обработку результатов. Граница ССН с различной степенью детализации изучена на протяжении 170 км электро- и магниторазведочными методами, гамма-спектрометрической, радиометрической, эманионной, литохимической и гидрохимической съемками, выполненными ОАО «Сосновгео», ФГУНПП «Геологоразведка» и ФГУП ВИМС. Используются также данные

комплексных аэрогеофизических съемок 2007–2008 гг. (ФГУНПП «Геологоразведка»), минералого-геохимические, изотопно-геохронологические и другие данные и результаты исследования образцов горных пород из скважин и канав, проведенные сотрудниками ФГУП ВСЕГЕИ и ФГУП ВИМС.

Наиболее ценные результаты были получены методом зондирования переходными процессами (ЗМП) на участке Деканда Ничатской площади с использованием совмещенной приемогенераторной установки размерами 50×50, 100×100 и 200×200 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Результатом комплексного геолого-геофизического изучения ряда участков Ничатской площади стало выявление ранее неизвестных рудоконтролирующих проводящих структур северо-западного простирания.

На карте графиков, построенных по данным метода СДВР (сверхдлинноволнового радиокомпарирования), четко устанавливается генеральное направление линейных аномалий, классифицированных по индукционному параметру электропроводности [6] (рис. 2).

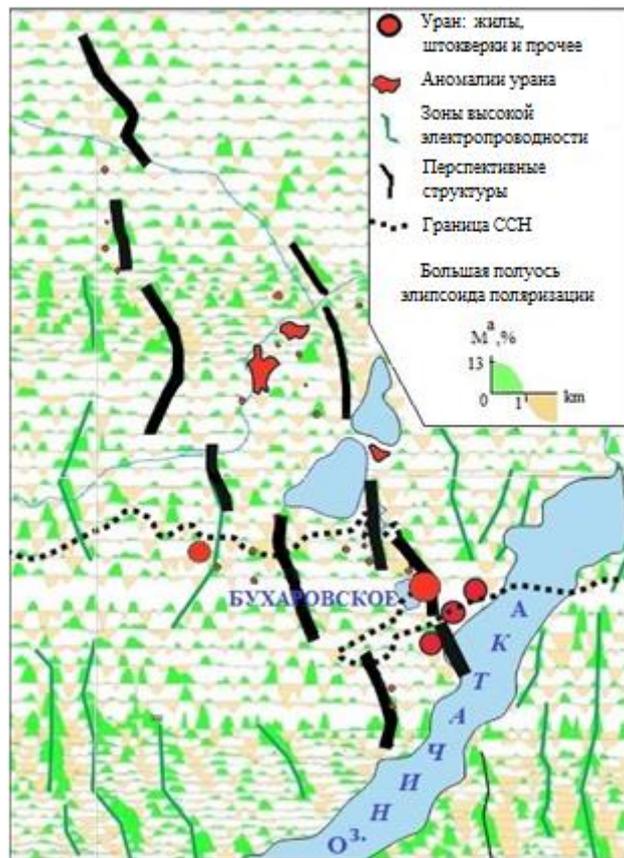


Рис. 2. Карта графиков аномалий большой полуоси эллипсоида поляризации магнитного поля по методу СДВР с элементами интерпретации на Ничатской площади (по материалам ФГУНПП «Геологоразведка»).
 На карту вынесены локальные аэрогамма-спектрометрические аномалии и известные урановые рудопоявления с целью определения их связи с элементами геоэлектрического строения площади

Индукционный параметр P – безразмерная величина, пропорциональная электропроводности локального объекта, его геометрическим характеристикам и размерам измерительной установки. Для расчета этого параметра используется следующая формула:

$$P = (\mu_0 \sigma \omega Q)^{1/2}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; σ – проводимость объекта; Q – геометрический множитель, пропорциональный площади сечения объекта и параметрам установки [6].

Объекты высокого среднего и низкого индукционного параметра P характеризуются сочетанием положительных аномалий амплитуды M^a эллипсоида поляризации с соответственно положительными, отрицательными или знакопеременными аномалиями фазы φ^a .

В ходе анализа рис. 2 мы предположили, что отдельные наиболее интенсивные линейные аномалии (черные линии) трассируют проводящую структуру северо-западного (субширотного) направления. Также была отмечена связь аэрогамма-спектрометрических и наземных аномалий радиоактивности с этими структурами.

Оси выделенных линейных аномалий (зон электропроводности) были нанесены на карты других изученных физических полей и их трансформант. Таким образом, при сопоставлении с данными аномального магнитного поля (рис. 3) была установлена определенная пространственная закономерность: вдоль вышеописанных линейных проводящих структур располагаются положительные магнитные аномалии, отделенные друг от друга областями отрицатель-



Рис. 3. Карта аномального магнитного поля Ничатской площади
(по материалам ФГУНПП «Геологоразведка»)

ных значений поля. Оси локальных аномалий ΔT субперпендикулярны осям аномалий индуктивности. С увеличением мощности осадочных отложений проявленность аномалий в магнитном поле ослабевает.

Поскольку эти аномалии разных порядков, можно предположить существование определенных региональных структур, имеющих так называемое «лестничное» внутреннее строение. Такое внутреннее строение зон проводимости и есть их главное отличие от «кондукторов» эталонного района – бассейна Атабаска, где они вытянуты вдоль разломов шовной зоны [3, 4].

Результаты сопоставления пространственного положения проводящих объектов с другими геофизическими полями подтверждают высказанное предположение.

На карте мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения горных пород (рис. 4, в) интересующие нас объекты сопровождаются коридором пониженной МЭД, а локальные аномалии U-Th-K природы, очевидно, находящи-

ся близко к дневной поверхности, обрамляют области расположения искоемых структур (рис. 4, д). На карте аэро-радиогеохимического картирования (АРК) [5] интересующая структура локализована в области пород преимущественно калиевой природы радиоактивности (рис. 4, з). Такая обратная зависимость по отношению к зонам проводимости обусловлена, по-видимому, увеличенной мощностью перекрывающих отложений рифейского чехла.

На карте эффективного удельного электрического сопротивления (рис. 4, е) зоны проводимости находятся в области низких значений $\rho_{эф}$ (заштрихованы).

Дискретный характер геофизических полей, наблюдаемый на всех картах, представленных на рис. 4, можно объяснить особенностями тектоники района. Известно, что в раннем-среднем рифее в исследуемом районе проявилась тектоно-магматическая активизация, которая привела к образованию сложных систем крутопадающих разломов и надвигов [7].

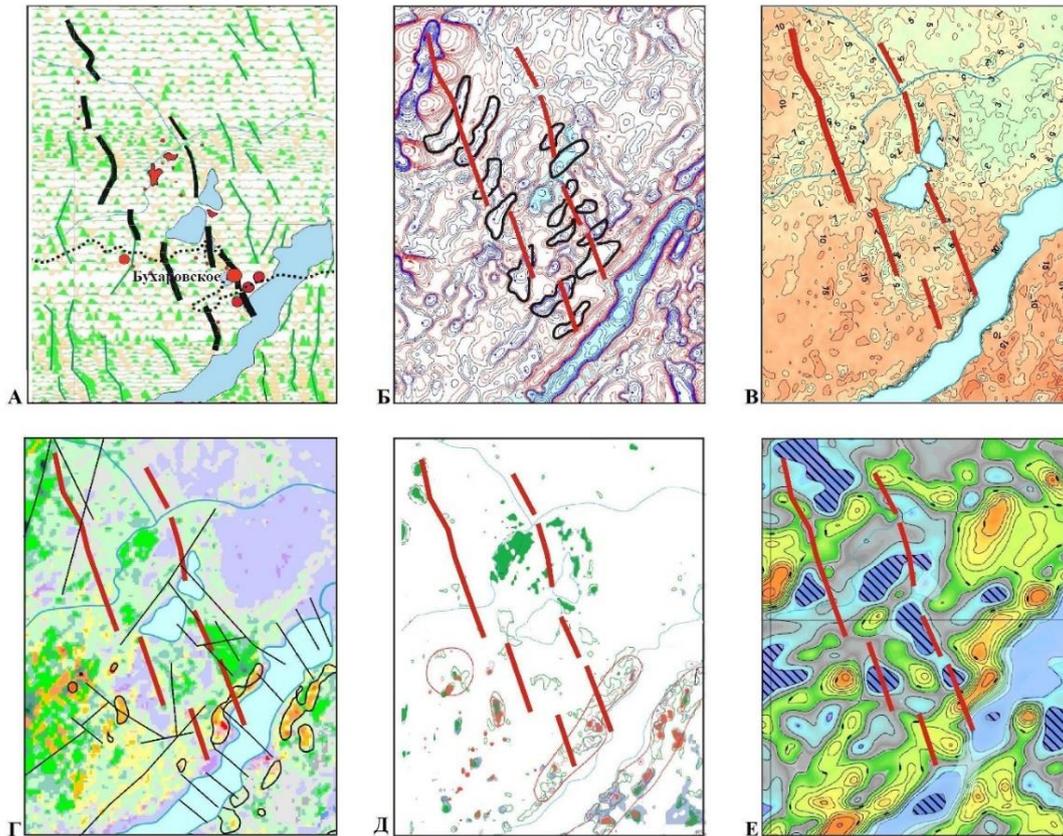


Рис. 4. Проявленность перспективных структур на картах физических полей Ничатской площади: а – зоны индуктивности; б – магнитное поле; в – МЭД; г – АРК; д – локальные АГС аномалии; е – эффективное электрическое сопротивление (по материалам ОАО «Сосновгео»)

Электромагнитная аномалия и рудопроявление урана Бухаровское.

При изучении методом ЗМПП участка Деканда Ничатской площади (см. рис. 1) была выявлена электромагнитная аномалия (рис. 5), прослеженная сетью параллельных профилей.

По результатам зондирований были построены псевдоразрезы сопротивлений без применения инверсии, а также карты этого параметра для разных горизонтов. Положение геоэлектрических границ разреза определялось по изменению наклона кривой $S_i(h_i)$ с учетом корреляции с соседними пикетами. По точкам перегиба кривой $S_i(h_i)$ определялась мощность Δh каждого слоя и увеличение продольной проводимости ΔS относительно предыдущего слоя. Использовались эмпирические формулы (2), (3) из работы [8].

$$S_i = \frac{E_\varphi^{5/3} \mu^{-4/3}}{(r/2)^{13/3} \left(\frac{3M}{\pi}\right) \left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)^{4/3}}, \quad (2)$$

$$h_i = 0.75 \left(\frac{3\mu r M}{128\pi}\right)^{1/3} \left(\frac{\partial E_\varphi}{\partial x}\right)^{1/3} E_\varphi^{-2/3}, \quad (3)$$

где S_i – кажущаяся продольная проводимость разреза; h_i – глубина залегания слоя; E_φ – ЭДС измеряемого сигнала; r – радиус приемной петли; M – магнитный момент генераторной петли; μ – магнитная проницаемость пород. Далее по формуле $R = \Delta h / \Delta S$ рассчитывалось удельное электрическое сопротивление.

Анализ полученных данных, представленный в работе [9], позволил интерпретировать аномалию вытянутым проводящим объектом мощностью 200–300 м, полого погружающимся на юго-восток. Сопротивление объекта – порядка 300 Ом·м при сопротивлении вмещающих пород 1000 Ом·м и более.

Контур аномалии на карте горизонта 300 м на фоне вмещающих пород (рис. 6), позволил оценить протяженность проводящего объекта в 600 м.

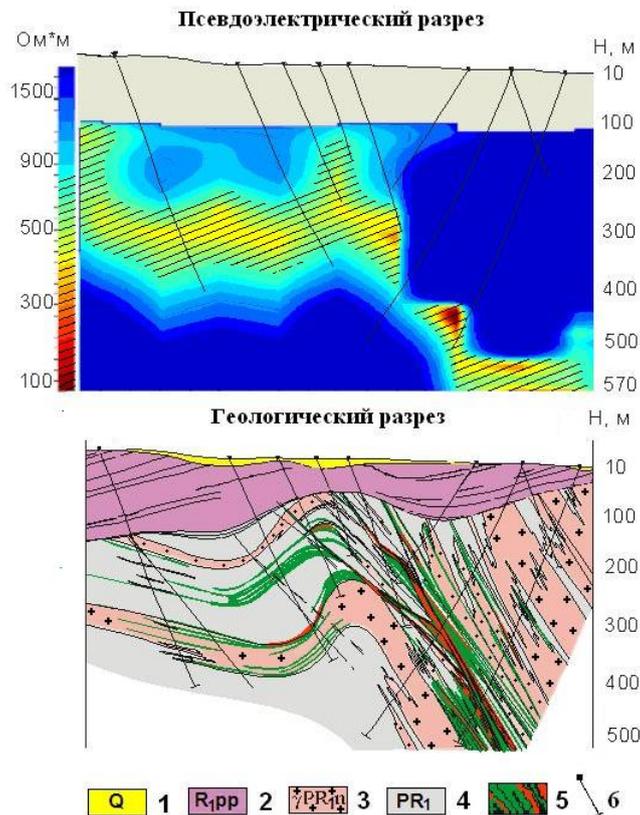


Рис. 5. Псевдоэлектрический разрез по ЗМПП и геологический разрез по участку Деканда (Бухаровское рудопроявление)
 (по материалам ОАО «Сосновгео» с использованием материалов ФГУНПП «Геологоразведка»):
 1 – четвертичные отложения; 2 – песчаники, гравелиты; 3 – граниты;
 4 – сланцы; 5 – оруденение; 6 – скважины

В дальнейшем проводящий объект был опоискован бурением, результатом которого стало выявление рудного тела с высоким содержанием урана гидротермального генезиса – рудопроявление Бухаровское (см. рис. 5).

Результаты исследований керна скважин рудопроявления Бухаровское позволяют предположить, что описываемый объект представляет собой ранее целостно существовавший блок графитизированных пород, претерпевший впоследствии тектоническое воздействие и преобразованный в грабеновую структуру, погружающуюся в южном направлении. Наиболее проявленная урановая минерализация тяготеет к субвертикальным тектоническим швам, которые в совокупности выполняют функцию «главного разлома» в привычном представлении о месторождениях типа несогласия. Значимое урановое оруденение сконцентрировано исключительно в нижнепрор-

терозойском кристаллическом цоколе. В предрифейской коре выветривания и отложениях рифейского чехла урановая минерализация не прослежена. Для коры выветривания отмечается хорошая сохранность (слабая измененность), не характерная для реголитов бассейна Атабаска [4].

Возраст уранового оруденения, определенный на твердофазном масс-спектрометре в прожилке, сложенном агрегатом оксида урана, замещающегося коффинитом, составил 1,2 млрд лет [5].

По мнению авторов, для Бухаровского рудопроявления наиболее применима «ingress»-модель рудообразования [3] с учетом ее реализации, изложенной в работе [10].

Заключение

Аномальный эффект ЗМПП, который позволил выделить рудоносную структуру, в значительной степени обусловлен скоплением графитсодержа-

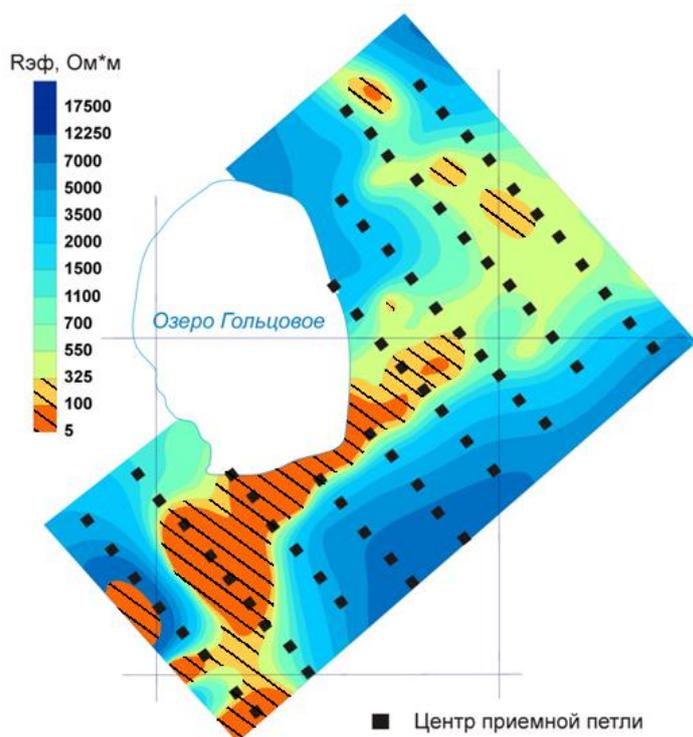


Рис. 6. План изом на горизонте 300 м по ЗМПШ на участке Деканда (по материалам ОАО «Сосновгео»)

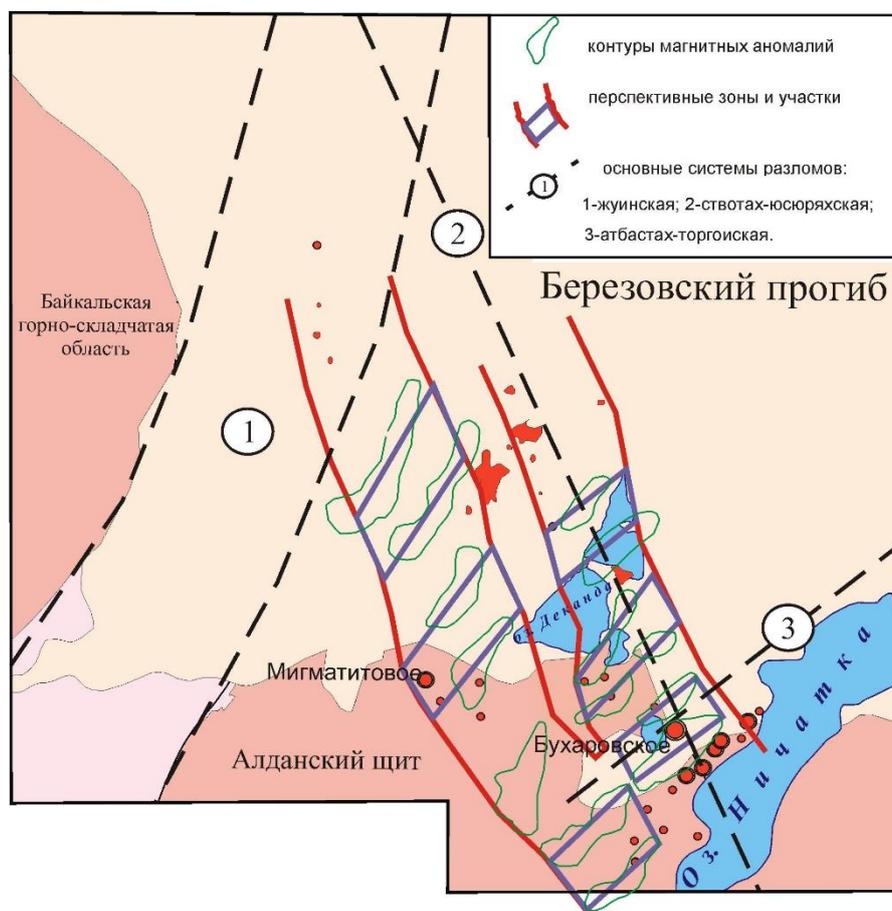


Рис. 7. Положение перспективных на уран зон и участков на Ничатской площади (по материалам ОАО «Сосновгео»)

шего материала в обломках вмещающих пород. Геологические структуры, состоящие из таких графитсодержащих пород, являются геохимическим барьером на пути движения ураноносных растворов, маркируют места возможного скопления рудного вещества и, обладая высокой электронной проводимостью, могут быть однозначно выделены индуктивными методами электроразведки.

Рудоперспективность выделяемых авторами структур подтверждается тем, что в такой обстановке расположено рудопроявление Бухаровское [7]. Кроме этого, анализ фактического материала

свидетельствует о наличии на площади работ большого количества радиометрических аномалий, выявленных как в кристаллических породах нижнего протерозоя, в зонах интенсивного гидротермально-метасоматического изменения, так и в терригенных осадках рифея в тектоно-метасоматических структурах. В ряде случаев такие аномалии приурочены к краевым частям аномалий магнитного поля, связанных с проводящими структурами, размер которых определяет ширину перспективных зон. По таким признакам нами выделены наиболее перспективные участки (рис. 7).

Библиографический список

1. Макарьев Л.Б. [и др.]. Нечеро-Ничатский урановорудный район (ведущие типы оруденения, обстановки локализации и перспективы) // Инф. сб. КНТС. 2006. Вып. 150. С. 5–17.

2. Пакульнис Г.В. О роли эндогенных и экзогенных факторов в формировании масштабных гидротермальных месторождений урана // Отечественная геология. 2001. № 4. С. 3–8.

3. Powell B., Wood G., Bzdel L., Advances in Geophysical Exploration for Uranium Deposits in the Athabasca Basin // Ore Deposits and Exploration Technology. Paper 52. Pp. 772–790.

4. Roy C., Halaburda J., Thomas D., Hirsekorn D. Millennium deposit – basement-hosted derivative of the unconformity uranium model. Uranium production and raw materials for the nuclear fuel cycle – Supply and demand, economics, the environment and energy security Proceedings of an international symposium. Vienna, 20–24 June 2005. Pp. 111–121.

5. Зайцев С.У. [и др.]. Отчет о результатах поисковых работ в западной части Березовского прогиба и его обрамлении (Иркутская область): геологический отчет (окончательный). ГР № 1-07-

261 / отв. исп. С.У. Зайцев, Е.А. Максимов, В.Ю. Кузнецов. Иркутск, 2010. 263 с.

6. Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 254 с.

7. Гребенкин Н.А. Эволюция гидротермально-метасоматических ураноносных процессов в истории геологического развития Чарского района // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru>

8. Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра, 1985. 192 с.

9. Путилов Б.А., Яхин А.М. Геометризация аномалий высокой проводимости по данным электромагнитных методов // Вестник ИРГТУ. 2012. № 13. С. 64–69.

10. Tao Cui, Jianwen Yang, Iain M. Formation of unconformity-related uranium deposits: perspectives from numerical modeling. AAPG Search and Discovery. Calgary, 2010. Article № 90172. Available at: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2014/90172cspg/abstracts/ndx_cui.pdf.html

References

1. Makar'ev L.B. Nechero-Nichatskii uranovorudnyi raion (vedushchie tipy orudneniya, obstanovki lokalizatsii i perspektivy) [Nechero-Nichatsky uranium ore district (leading types of mineralization, localization and prospects)]. *Materialy po geologii mestorozhdenij urana, redkih i redkozemel'nyh metallov* [Materials on the geology of uranium deposits of rare metals], 2006, no. 150, pp. 5–17.
2. Pakul'nis G.V. O roli endogennykh i ekzogennykh faktorov v formirovani masshtabnykh gidrotermal'nykh mestorozhdenii urana [On the role of endogenous and exogenous factors in the formation of large-scale hydrothermal uranium deposits]. *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2001, no. 4, pp. 3–8.
3. Powell B., Wood G., Bzdel L., Advances in Geophysical Exploration for Uranium Deposits in the Athabasca Basin. *Ore Deposits and Exploration Technology*. Paper 52, pp. 772–790.
4. Roy C., Halaburda J., Thomas D., Hirsekorn D. *Millennium deposit – basement-hosted derivative of the unconformity uranium model. Uranium production and raw materials for the nuclear fuel cycle – Supply and demand, economics, the environment and energy security Proceedings of an international symposium*. Vienna, 20–24 June 2005, pp. 111–121.
5. Zaitsev S.U. *Otchet o rezul'tatakh poiskovykh rabot v zapadnoi chasti Berezovskogo progiba i ego obramlenii (Irkutskaya oblast'): geologicheskii otchet (okonchatel'nyi)*. GR № 1-07-261 [A report on the results of prospecting in the western part of the Berezovsky depression and its frame (Irkutsk region): geological report (final). GR no. 1-07-261] / S.U. Zaitsev, E.A. Maksimov, V.Yu. Kuznetsov. Irkutsk, 2010. 263 p.
6. Svetov B.S. *Teoriya, metodika i interpretatsiya materialov nizkochastotnoi induktivnoi elektrorazvedki* [Theory, methodology and interpretation of the materials of low-frequency induction electroprospecting]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 254 p.
7. Grebenkin N.A. Evolyutsiya gidrotermal'no-metasomaticheskikh uranovosnykh protsessov v istorii geologicheskogo razvitiya Charskogo raiona [The evolution of hydrothermal-metasomatic uranium processes in the history of geological development of the Charsky area]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no. 3. Available at: <http://www.science-education.ru>
8. Sidorov V.A. *Impul'snaya induktivnaya elektrorazvedka* [Pulsed inductive electroprospecting]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 192 p.
9. Putilov B.A., Yakhin A.M. Geometrizatsiya anomalii vysokoi provodimosti po dannym elektromagnitnykh zondirovaniy [Geometrization of high conductivity anomalies by electromagnetic sounding data]. *Vestnik IRGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 12, pp. 64–69.
10. Tao Cui, Jianwen Yang, Iain M. *Formation of unconformity-related uranium deposits: perspectives from numerical modeling*. *AAPG Search and Discovery*. Calgary, 2010. Article no. 90172. Available at: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2014/90172cspg/abstracts/ndx_cui.pdf.html

Статья поступила 15.09.2016 г.

Article received 15.09.2016.