

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.37

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО НОВООБРАЗОВАНИЯ “ЯМАЛЬСКИЙ КРАТЕР”

В.В. Оленченко, А.И. Синицкий*, Е.Ю. Антонов, И.Н. Ельцов, О.Н. Кушнарченко,
А.Е. Плотников, В.В. Потапов, М.И. Эпов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru*

** Комплексный отдел ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, 142717, пос. Развилка, Московская обл., Россия*

Представлены и обсуждены результаты натурного обследования и геофизических наблюдений на территории редкого геологического объекта, известного как “Ямальский кратер”. Главной целью было выяснение природы образования кратера. В 2014 г. проведены геокриологические и геоморфологические наблюдения, отбор проб горных пород, воды, геодезические и геофизические съемки. В результате было установлено отсутствие радиационных аномалий и показано, что кратер расположен в контурах кольцевой отрицательной аномалии магнитного поля, приуроченной к пересечению линейных отрицательных аномалий магнитного поля. Установлено, что кратер находится на стыке геоэлектрических структур, а на глубине 60–80 м выделены геофизические признаки насыщенного газогидратами горизонта. Предполагается, что источником газа является или глубинный газ, мигрирующий по разломам, или разложение реликтовых газогидратов. Показано, что на месте кратера ранее был бугор пучения. Обозначена проблема идентификации опасных бугров пучения, решение которой возможно путем проведения комплексных исследований, включающих геокриологические и геофизические изыскания, а также бурение.

“Ямальский кратер”, булгуны, многолетнемерзлая толща, газ, газогидрат, разлом, геофизические методы, геоэлектрический разрез, электротомография, электромагнитное зондирование

RESULTS OF GEOPHYSICAL RESEARCHES OF THE AREA
OF NEW GEOLOGICAL FORMATION “YAMAL CRATER”

V.V. Olenchenko, A.I. Sinitsky*, E.Y. Antonov, I.N. Eltsov, O.N. Kushnarenko,
A.E. Plotnikov, V.V. Potapov, M.I. Epov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
630090, Novosibirsk, pr. Acad. Koptuyga, 3, Russia; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru*

** Gazprom VNIIGAZ, 142717, Razvilka village, Moscow region, Russia*

Results of the field survey and geophysical observations on the area of the rare geological objects known as “Yamal crater” have been presented and discussed. The purpose of the research was to determine the origin of the crater. In 2014, permafrost and geomorphological observations, sampling of soil, water, geodetic and geophysical surveys were carried out. As a result, the absence of radiation anomalies has been revealed. It has been demonstrated that the crater is situated within the limits of the circular negative anomalies of the magnetic field, nearby the intersection of the linear negative anomalies of the magnetic field. It was found that the crater occurs at the junction of geoelectrical structures, and the geophysical showings of the horizon saturated with gas-hydrates have been detected at a depth of 60–80 m. It is suggested that both the abyssal migratory gas and the gas-hydrate decomposition could be the source of the gas. It was shown that the pingo existed on the place of the crater. The problem of identification of the hazardous pingo has been stated. This problem can be solved by complex investigations, including permafrost and geophysical surveys as well as drilling.

“Yamal crater”, pingo, permafrost, gas, gas hydrate, fault, geophysical methods, geoelectric section, electrical resistivity tomography, electromagnetic sounding

ВВЕДЕНИЕ

В начале 2014 г. в прессе и интернете появилась информация в виде фото- и видеоматериалов о необычном геологическом новообразовании, об-

наруженном на п-ове Ямал, недалеко от Бованенковского месторождения. Новообразование представляло собой круговое отверстие в земле внуши-

© В.В. Оленченко, А.И. Синицкий, Е.Ю. Антонов, И.Н. Ельцов, О.Н. Кушнарченко, А.Е. Плотников, В.В. Потапов, М.И. Эпов, 2015

тельных размеров с бруствером по окружности. Визуальное обследование объекта, выполненное 16 июля 2014 г. в ходе первой экспедиции под руководством д-ра геол.-мин. наук М.О. Лейбман, показало, что диаметр кратера не превышает 30 м, его глубина более 50 м. По внешним признакам кратер возник вследствие выброса газа [Лейбман, Плеханов, 2014; Leibman et al., 2014].

Образование кратера в непосредственной близости от Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (БНГКМ) и газопровода Бованенково–Ухта обусловило необходимость исследования подобных явлений для выяснения причин возникновения, оценки степени опасности и выявления прогнозных признаков их образования. Для исследования этого феномена в период с 13 по 18 сентября 2014 г. при поддержке ООО “Газпром добыча Надым” была организована комплексная экспедиция, в состав которой входили специалисты Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ) СО РАН (Новосибирск) и Научно-исследовательского института природных газов и газовых технологий – ООО “Газпром ВНИИГАЗ” (Москва). Главной целью полевых работ было выяснение природы геологического новообразования.

Основные задачи геофизических исследований: оценка геологического и геокриологического строения территории, установление возможной связи местоположения кратера с геофизическими аномалиями, определение положения кратера в геофизических полях, на картах и разрезах удельного электрического сопротивления пород.

Еще одна важная задача, которую предстояло решить геофизическими методами, – исключение либо подтверждение антропогенной или космогенной гипотез образования кратера.

Геоморфологическое строение, геологическая и геокриологическая характеристика территории исследования

Район исследований расположен в центральной части полуострова Ямал. В геоморфологическом отношении это поверхность плоской аккумулятивно-эрозионной равнины, расчлененной речной и овражной сетью. Равнина заболочена, заозерена и разбита полигональными трещинами. Абсолютные отметки поверхности изменяются от 0.5–3.0 до 41–45 м на водоразделах. Строение равнины двухступенчатое: останцы третьей морской верхнеплейстоценовой террасы и надпойменных верхнеплейстоцен-голоценовых террас образуют верхнюю ступень, а плоские поверхности пойм рек Сеяха и Мордыаха представляют нижнюю ступень [Баулин, 1996].

Территория исследований расположена в подзоне типичных тундр, в которой развиты мохово-лишайниково-кустарничковая, кустарниковая

и осоково-моховая растительные ассоциации. Растительный покров густой, представлен различными видами осок, пушицей и редким разнотравьем, мхом [Полуостров..., 1975].

Здесь находится большое количество термокарстовых озер, площадь которых за период с 1992 по 2002 г. в низкой и средней пойме увеличилась на 5 %, а на водоразделах сократилась на 7 % [Санников, 2012].

В геологическом строении района на глубину до 500 м участвуют палеоген-четвертичные рыхлые породы преимущественно суглинисто-глинистого состава [Скоробогатов, 2003]. В нижней части эти отложения представлены морскими палеоцен-эоценовыми (mP_{1-2}) серыми и темно-серыми суглинками с включениями гравия, гальки и остатков фауны, а также темно-серой (до черной) глиной с многочисленными остатками морской фауны и присыпками пылеватого песка, мощность которых около 250 м. Выше повсеместно залегают нижнесреднеплейстоценовые морские отложения ямальской серии (mQ_{1-11}^{1-2}), мощность которых в районе БНГКМ составляет 120–200 м. Отложения ямальской серии представлены серыми суглинками с тонкими прослоями пылеватого светло-серого песка с черными углистыми пятнами. К породам ямальского возраста приурочены зафиксированные при бурении мерзлотно-параметрических скважин на БНГКМ многочисленные выбросы газа, связанные, как правило, с разложением реликтовых газовых гидратов [Чувиллин, 2007].

В основании палеоген-четвертичного комплекса залегает мощная глинистая туронско-маастрихская толща верхнего мела, подстилаемая сеноманскими газоносными отложениями [Козлов и др., 1999; Скоробогатов, 2003].

Кратер расположен над известной унаследованной положительной структурой (Южно-Муртинская), приуроченной к нижнесреднеюрским отложениям [Астафьев, Скоробогатов, 2006].

Район исследований характеризуется сплошным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), которые развиты от поверхности на глубине до 180–300 м. Мощность ММП зависит от геоморфологии и ландшафтных условий и изменяется от 120 до 250 м [Чувиллин, 2007]. Среднегодовая температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд на территории БНГКМ составляет $-4...-6$ °C [Баулин, 1996].

Верхняя часть разреза осложнена высокольдистыми породами и ледогрунтами, а также ледяными телами различной формы – повторно-жильными и пластовыми льдами, на поверхности встречаются отдельные бугры пучения, как отдельные, небольшие по размерам, так и крупные инъекционные бугры пучения – булгуньяхи [Баулин, 1996; Дубиков, 2002].

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения или исключения различных гипотез образования кратера был выполнен комплекс работ, включающий морфометрические исследования, отбор проб грунта и воды, геофизические измерения методами радиометрии, магниторазведки, электротомографии и зондирования становлением поля в ближней зоне.

Геолого-геоморфологические и ландшафтные исследования включали: 1) определение геоморфологического положения кратера, гидрологических и ландшафтных условий; 2) изучение современного состояния (в том числе нарушенности) растительного и почвенного покровов в районе кратера; 3) определение точного пространственного положения кратера (GPS-съемка); 4) картирование зоны выброса (ареала разброса) грунта; 5) геодезическую съемку.

По заранее разработанной схеме на местности были расставлены реперы (металлические колья) и произведены геодезические замеры с помощью GPS-приемника, лазерного дальномера LTI TruPulse 200/200B, буссоли DQL-8, геодезической вешки со светоотражателем и рулетки.

В результате были получены данные для точного определения пространственного положения ключевых границ кратера, а также уреза воды внутри. Эти данные послужили основой для построения модели кратера.

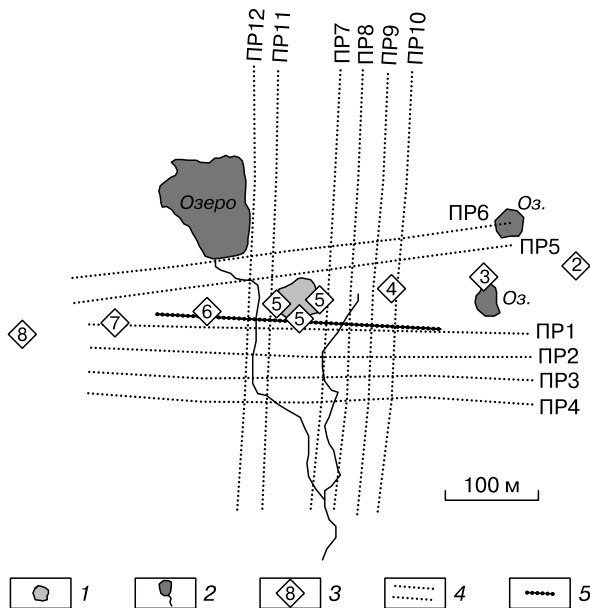


Рис. 1. Схема расположения профилей электротомографии, приемных датчиков при зондировании становлением поля и профиля радиометрии:

1 – кратер; 2 – гидросеть; 3 – приемный датчик; 4 – профили электротомографии; 5 – профили радиометрии.

Глубина рядом расположенных озер определялась с помощью мерной рейки и эхолота-глубиномера JJ-Connect Fisherman 130. Температура воды в озерах измерялась встроенным в эхолот термометром, а в кратере – электронным термометром НОВО U12-015-02.

Комплекс геофизических методов включал электротомографию (ЭТ), зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), магниторазведку и радиометрию.

Исследования методом ЭТ выполнены аппаратурой «Тундра-48», являющейся модификацией аппаратуры «Скала-48», разработанной в ИНГГ СО РАН [Балков и др., 2012]. При измерениях применялась диполь-дипольная установка с размером диполей 15 м, которая дала возможность изучить разрез на глубину до 55 м. Шаг измерений по профилю составил 5 м. Исследования методом ЭТ выполнялись по ортогональной сети (по шесть профилей в субширотном и субмеридиональном направлениях). Расстояние между профилями около 25 м. Длина профилей – по 475 м. Схема расположения профилей ЭТ приведена на рис. 1. Обработка данных производилась с помощью программ Res2Dinv, Res3Dinv (Geotomo Software) [Loke et al., 2003].

Зондирования становлением поля выполнялись по профилю, проходящему непосредственно через кратер (см. рис. 1). Размер генераторной петли составлял 100 × 100 м, шаг по профилю – 100 м. Регистрация электромагнитного поля осуществлялась рамочными датчиками размером 1 × 1 м, эквивалентными по магнитному моменту одновитковой петле размером 50 × 50 м. Датчики располагались в центре каждой генераторной петли и с разносом 100 м по линии профиля. Непосредственно над кратером измерения были сделаны в трех точках на бруствере: с западной, восточной и южной сторон кратера.

Измерения процесса становления электромагнитного поля были выполнены с применением аппаратуры SGS-TEM (производство ООО «НПК «Сибгеосистемы») и Fast-Snap (www.sibgeosystems.ru/hardware/FastSnap/) и с использованием специализированного программного обеспечения для аппаратуры Fast-Snap. Общий объем работ методом ЗСБ составил 20 точек физических наблюдений от 9 генераторных петель. Количественная интерпретация данных измерений методом ЗСБ выполнялась при помощи программы TEM-IP, разработанной в ИНГГ СО РАН [Антонов и др., 2014]. Интерпретация заключалась в определении мощности, удельного электрического сопротивления ($УЭС$) и параметров поляризуемости слоев, слагающих разрез.

Магниторазведочные исследования выполнялись по нерегулярной сети наблюдений в процессе маршрутной съемки «зигзагом». Полный вектор магнитной индукции измерялся протонным овер-

хаузеровским магнитометром GEM-19T (GEM Systems, Канада). Обработка данных заключалась в учете суточных и короткопериодных вариаций магнитного поля и построении карты изодинам. Интерпретация проводилась на качественном уровне: выделялись аномалии того или иного знака, оценивались их интенсивность, форма и простижение.

Измерения естественной радиоактивности осуществлялись аппаратурой СРП-68-01 (<http://ntfprompribor.ru/page145572>). Профиль радиометрии пересекал участок исследований в субширотном направлении. Схема расположения профиля представлена на рис. 1. Измерения выполнялись по профилю через каждые 5–7 м, по результатам их строился график естественной радиоактивности (гамма-фона) вдоль профиля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геоморфологические и геодезические наблюдения

“Ямальский кратер” расположен в 39 км к югу от ближайшего производственного объекта Бованенковского НГКМ (куст газовых скважин 610) и менее чем в 4 км к востоку от действующего магистрального газопровода Бованенково–Ухта. Координаты объекта в системе WGS 84: северная бровка кратера – N69 58.280 E68 22.239, центральная часть – N69 58.268 E68 22.214.

В результате натурных наблюдений была составлена геоморфологическая схема района кратера с определенными криогенными процессами, явлениями и ландшафтной характеристикой территории (рис. 2).

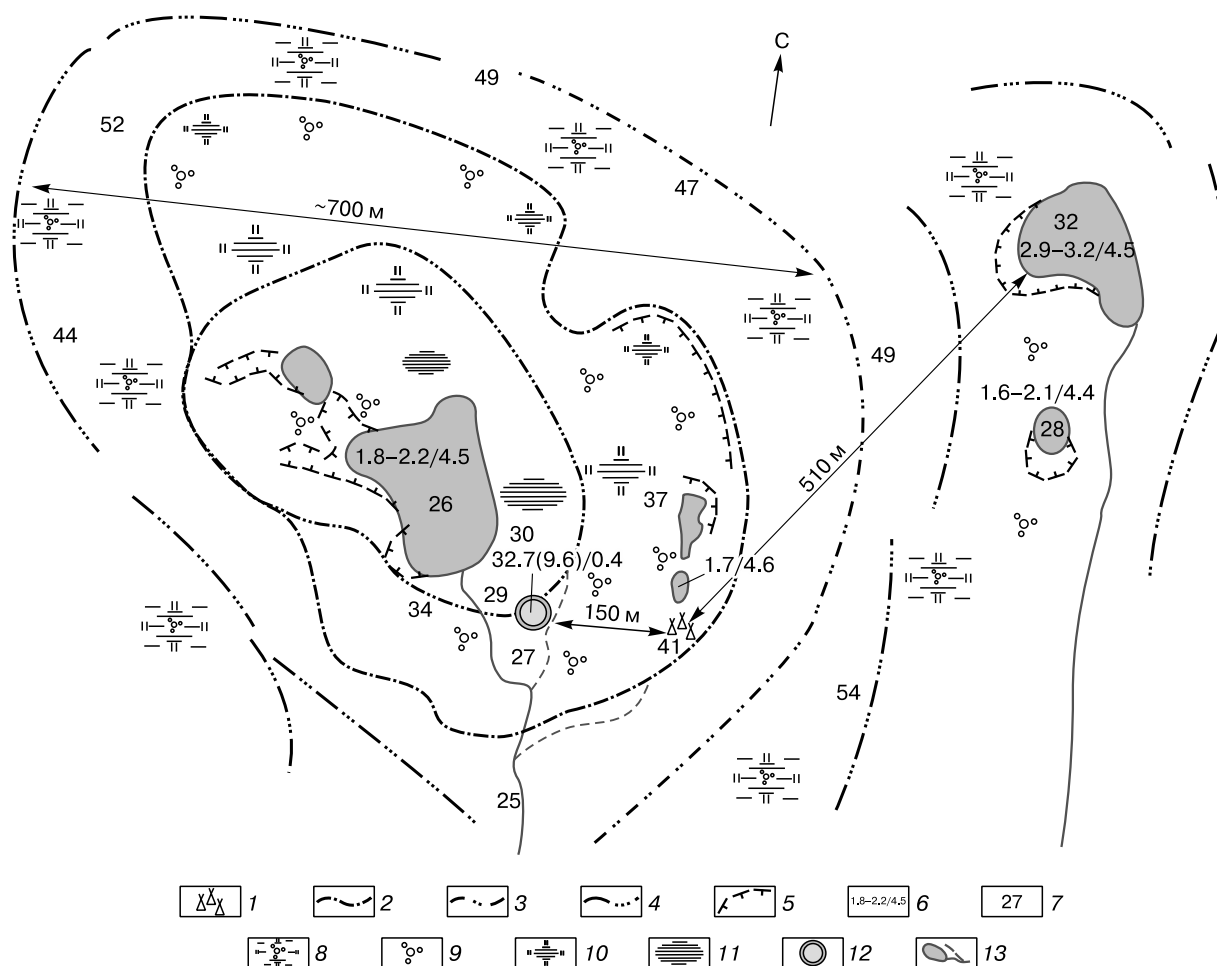


Рис. 2. Геоморфологическая схема участка исследований:

1 – полевой лагерь; 2 – берег палеозера № 1; 3 – берег палеозера № 2; 4 – водоразделы; 5 – криогенные оползни и сплывы, термокарст; 6 – глубина (м)/температура (°C) в озере или кратере; 7 – абсолютные отметки дневной поверхности; 8 – кустарничковая, редко мохово-лишайниковая, растительность, мелкобугристая тундра (полярная березка, ягодные кустарнички, осока, мхи, лишайники); 9 – кустарниковая растительность, ложбины стока, долины водотоков, подножия крутых склонов (разнотравный ивняк, ерник высотой 0.5–1.0 м, реже до 2 м); 10 – мохово-лишайниковая, осоковая, редко кустарничковая, растительность (днища палеозер, склоны оврагов); 11 – осоковая, редко мохово-лишайниковая, растительность, болото (днища палеозер, русла и долины водотоков); 12 – кратер; 13 – гидросеть.

На рис. 2 видно, что исследуемая территория совсем недавно (в геологическом масштабе времени) была затоплена. На это указывают характерные высокие берега палеозера, которые прослеживаются в рельефе практически по всему периметру данной площади (кроме южной части). Диаметр палеозера составлял около 700 м. Последующее осушение водоема, видимо, происходило ступенчато.

Фрагменты более позднего палеозера, расположенного внутри предыдущего, также читаются в современном рельефе. По краям развита кустарниковая растительность (ивняк), характерная для ложбин стока, долин водотоков. Именно здесь, в южной части изучаемого района, в месте пересечения современного водотока (ручья, вытекающего из озера) и береговой линии внутреннего палеозера находится кратер. Долина ручья является геоморфологическим признаком тектонического нарушения субмеридионального простириания.

В 15 м к западу от кратера обнаружен небольшой водопад в ручье. Водопад расположен на границе разноуровневых поверхностей, что является геоморфологическим признаком тектонического контакта (разлома) субширотного простириания [Костенко, 1999].

По данным гидрологических исследований близлежащих озер установлено, что их глубина не имеет аномальных значений и составляет 1.8–3.2 м в зависимости от размера. Температура воды в озерах была равна 4.4–4.5 °С.

При обследовании местности на предмет выброшенных фрагментов горных пород и следов от ударов пластового льда зафиксировано 47 обломков, хотя реальное их количество должно быть больше. Размеры обломков пород (комков суглинка и супеси) изменяются от 2 м и более у самого бруствера до 0.2 м на периферии. Выброшенные

фрагменты породы и льда фиксируются по всему периметру вокруг кратера, радиус разброса кусков более 160 м.

По результатам обследования кратер можно охарактеризовать следующими особенностями в строении. По окружности воронки располагается выброшенная порода в виде бруствера, высотой от 1 до 4 м. Верхняя часть разреза кратера до глубины 2–3 м представлена льдистыми супесчаными и глинистыми породами (рис. 3). Кратер имеет жерло, стенки которого уходят вниз под отрицательным углом. Всю видимую вертикальную часть разреза, за исключением первых 2.5–3.0 метров, составляет пластовый лед, слои которого имеют угловое несогласие с перекрывающими отложениями. В стенке кратера также обнажается горизонтально залегающая линза молочно-белого льда.

Нижняя часть кратера заполнена талой водой, вода очень мутная, со взвесью глинистых частиц. На поверхности плавает “шуба” из растительных остатков и корней. В нижней части жерла с северо-восточной стороны, на границе уреза воды, видна крупная ниша вывала или вытаивания (см. рисунок на обложке). Верхняя кромка ниши на момент исследований располагалась на глубине 16.5 м от дневной поверхности.

Анализ проб почвы, породы, воды из кратера и прилегающей территории проводился в лаборатории хроматографического анализа Инженерно-технического центра ООО “Газпром добыча Надым”. В результате анализов установлено, что какие-либо аномалии по содержанию различных компонентов в пробах почвы с бруствера кратера и прилегающей территории отсутствуют.

Составы воды кратера и озер различаются. В составе воды из кратера обнаружено повышенное содержание гидрокарбонат-иона (166 мг/м^3) по сравнению с озерной водой ($22\text{--}42 \text{ мг/м}^3$), нефтепродуктов (1.31 мг/м^3 на фоне $0.16\text{--}0.22 \text{ мг/м}^3$), а также меди (0.0081 мг/м^3), марганца (0.48), ртути ($4 \cdot 10^{-5}$), фенолов ($5.4 \cdot 10^{-3}$), аномальное содержание нитрат-иона (10.24) и нитритного азота (0.02 мг/м^3). Удельная электропроводность воды из кратера составила 395 мкСм/см , а воды из озер – $120\text{--}310 \text{ мкСм/см}$. Аномально высоким является также показатель ХПК (химическое потребление кислорода). Он составляет $7017 \text{ мгО}_2/\text{л}$ у воды из кратера в сравнении с $40\text{--}63 \text{ мгО}_2/\text{л}$ у озерной воды. Показатель ХПК характеризует суммарное содержание в воде органических веществ по количеству израсходованного на окисление химически связанного кислорода. Предполагается, что основной источник органики в воде из кратера – это обвалившиеся в кратер почвенно-растительный слой и супесчано-суглинистые породы с большим количеством растительных остатков.

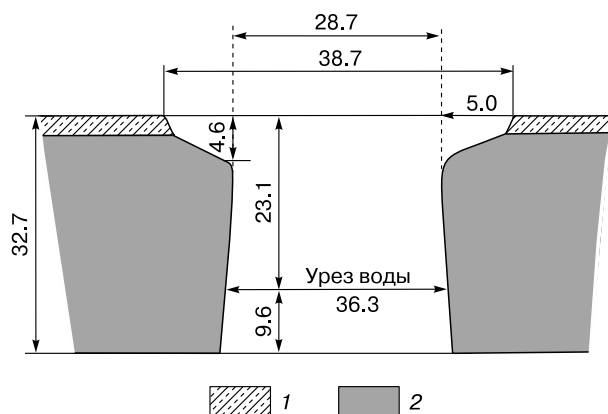


Рис. 3. Схематический разрез кратера (размеры в метрах):

1 – супеси и суглинки; 2 – пластовый лед.

Более подробно характеристика рельефа и строение кратера описаны в работе [Кизяков и др., 2015].

Различие в химическом составе воды объясняется тем, что кратер заполняется стоком воды оттаивающих ледяных стенок и пород бруствера, а озера заполняются преимущественно атмосферными осадками. В пробах пород из бруствера и прилегающей территории установлено присутствие меди (24–86 мг/кг) и нефтепродуктов (6–198 мг/кг), что дает основание предполагать попадание этих элементов в воду кратера с поверхности, в результате обвала бруствера.

Результаты геофизических исследований

На рис. 4, а приведена карта изолиний приращения модуля полного вектора магнитной индукции (карта изодинам). Магнитное поле изменяется в узких пределах – от -11 до $+13$ нТл. Кратер расположен в области пересечения линейно вытянутых отрицательных аномалий магнитного поля, северо-западного и северо-восточного направлений. Простираение аномалий совпадает с господствующим простираением разломов в районе исследований [Подурушин, 2011]. Поэтому эти аномалии магнитного поля могут быть связаны с гипергенными изменениями пород в зоне разломов, вызванными окислением акцессорных магнитных минералов и их преобразованием в немагнитные минералы.

Локальная интенсивная отрицательная аномалия в 20 м южнее кратера связана с металлическими штырями (устройство закрепления альпинистской страховки, оставшейся от предыдущей экспедиции).

Правый берег ручья (западная часть участка) находится в отрицательном магнитном поле. Простираение этой зоны предположительно субмеридиональное, близкое к северо-северо-западному. Отрицательное поле в западной части участка может быть связано с зоной тектонического нарушения северо-северо-западного простираения.

На трехмерной поверхности изодинам видно, что кратер приурочен к изометричной отрицательной аномалии магнитного поля диаметром около 100 м, а эта аномалия, в свою очередь, тяготеет к узлу пересечения предполагаемых разломов (см. рис. 4, б). Изометричная в плане отрицательная аномалия магнитного поля может быть объяснена наличием вертикального канала миграции углеводородов к поверхности [Безукладнов, Мавричев, 1997].

Таким образом, по данным магниторазведки установлено, что кратер расположен в локальной изометричной отрицательной аномалии магнитного поля. Выявлены фрагменты линейных отрицательных аномалий северо-восточного и северо-северо-западного простираений, к узлу пересечения которых приурочен кратер. Простираение линейных аномалий магнитного поля совпадает с генеральным простираением разломной тектоники.

Отсутствие интенсивных аномалий магнитного поля, характерных для крупных железных объектов (таких как метеорит), позволяет частично исключить космогенную природу возникновения кратера, так как известно, что железные и железокремниевые метеориты составляют лишь 7.2 % общего количества падающих на Землю метеоритов (www.meteorites.ru/kr_o_met.html). Малое (в процентном отношении) количество железных

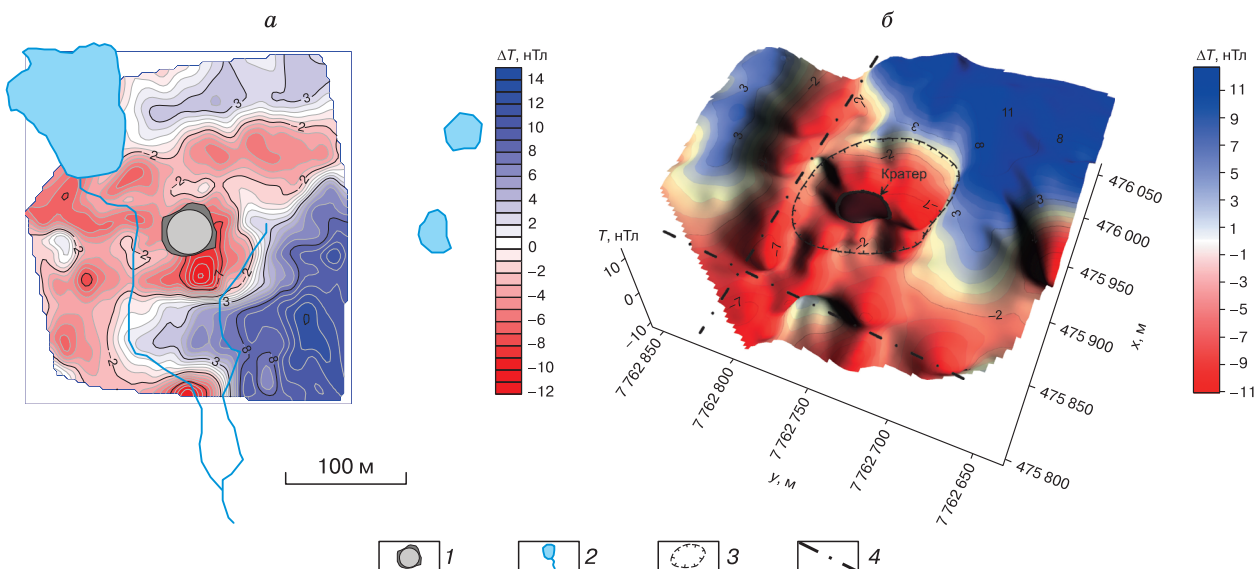


Рис. 4. Карта (а) и поверхность (б) приращения полного вектора магнитной индукции (ΔT):

1 – кратер; 2 – гидросеть; 3 – контур изометричной отрицательной аномалии ΔT ; 4 – оси линейных отрицательных аномалий ΔT .

метеоритов, попадающих на Землю, не позволяет полностью исключить гипотезу импактного происхождения кратера при отсутствии другой информации.

Измерения уровня гамма-фона не зафиксировали каких-либо значимых аномалий в пределах участка работ. Аналогичные выводы сделаны на основе измерений 16 июля 2014 г., т. е. в начале первого лета существования воронки [Лейбман, Плеханов, 2014]. Интенсивность радиоактивного поля, по нашим данным, изменяется от 7 до 11 мкР/ч. Небольшое повышение фона в пределах кратера связано с отсутствием мохового покрова на материале бруствера. Минимальные значения поля наблюдаются над обводненными участками профиля.

Результаты электротомографии

Статистическая обработка данных электротомографии показала, что в массиве выделяется три группы пород, различающихся по удельному электрическому сопротивлению (рис. 5). Согласно известным зависимостям УЭС от температуры и литологического состава [Вахромеев, 1997; Фролов, 1998; СП 11-105-97..., 2004], при температуре -5°C , характерной для глубины нулевых годовых колебаний на площади исследований [Баулин, 1996], породам с УЭС порядка 250 Ом·м соответствуют мерзлые суглинки. Максимум на гистограмме, равный 1350 Ом·м, отвечает супесям. Самые высокие УЭС (десятки тысяч ом на метр) соответствуют льдам. Таким образом, мы установили критерии для геологической интерпретации геоэлектрических разрезов, которые не противоречат данным о строении района исследований [Чувиллин, 2007]. Установленные на основе статистического анализа модальные значения УЭС нельзя



Рис. 5. Гистограмма распределения удельного электрического сопротивления геологических моделей на площади исследований (по результатам двумерной инверсии).

применять догматично при интерпретации электротомографических данных. Увеличение льдистости пород приводит к значительному возрастанию их УЭС, а повышение засоленности, наоборот, существенно снижает электрическое сопротивление. Поэтому значения УЭС для разных петрофизических групп перекрываются.

На рис. 6, а, б приведены геоэлектрические разрезы соответственно по профилю 1 и профилю 7, расположенным примерно в 15 м с южной и восточной сторон кратера. На разрезах низким УЭС (100–250 Ом·м) соответствуют мерзлые суглинки, области с УЭС более 2000 Ом·м интерпретируются как высокольдистые отложения и лед.

На разрезе по профилю 1 справа от проекции кратера на разрез выделяется субвертикальная зона пониженного УЭС мощностью около 30 м (см. рис. 6, а). Несмотря на то что в стенках кратера на видимую глубину (23.1 м) вскрывается лед (см. рис. 3), на геоэлектрическом разрезе с южной стороны видно, что обусловленная льдом аномалия локальна, а пластовый лед в верхней части разреза с южной стороны кратера залегает не сплошным слоем (см. рис. 6, а).

На разрезе по профилю 7 (с восточной стороны кратера) в пределах палеоозера с глубины около 10 м выделяется пластовая залежь льда, нижняя граница которой не установлена (см. рис. 6, б). Экранирующий эффект не позволяет электрическому току проникать через слой изолятора (льда) при наличии обводненного слоя низкого сопротивления (воды) на заболоченной поверхности. Рядом с кратером толщину пластового льда можно оценить по мощности слоя высокого УЭС, которая составляет примерно 18 м. В центральной части профиля (интервал 230–260 м) на глубине 30–50 м выделяется вертикальная аномальная область низкого УЭС (менее 500 Ом·м) с горизонтальной мощностью 30 м. Возможно, эта аномалия связана с (талым?) подводящим каналом, по которому шла миграция газа к поверхности. Однако наличие талого канала надо доказывать термометрическими методами.

В точке пересечения профилей (пикет 220 м на профиле 1 соответствует пикету 280 м на профиле 7) отмечается несоответствие геоэлектрических моделей, что объясняется следующим. Геоэлектрические разрезы представляют собой результат двумерной (2D) инверсии в предположении, что среда двумерна. На самом деле геологическая среда в пределах участка исследования представляет собой сложный трехмерный (3D) объект. При решении обратной задачи в рамках 2D модели разрезы искажаются влиянием трехмерных геологических неоднородностей. От того, как будет расположен профиль относительно этих неоднородностей, будет зависеть итоговая гео-

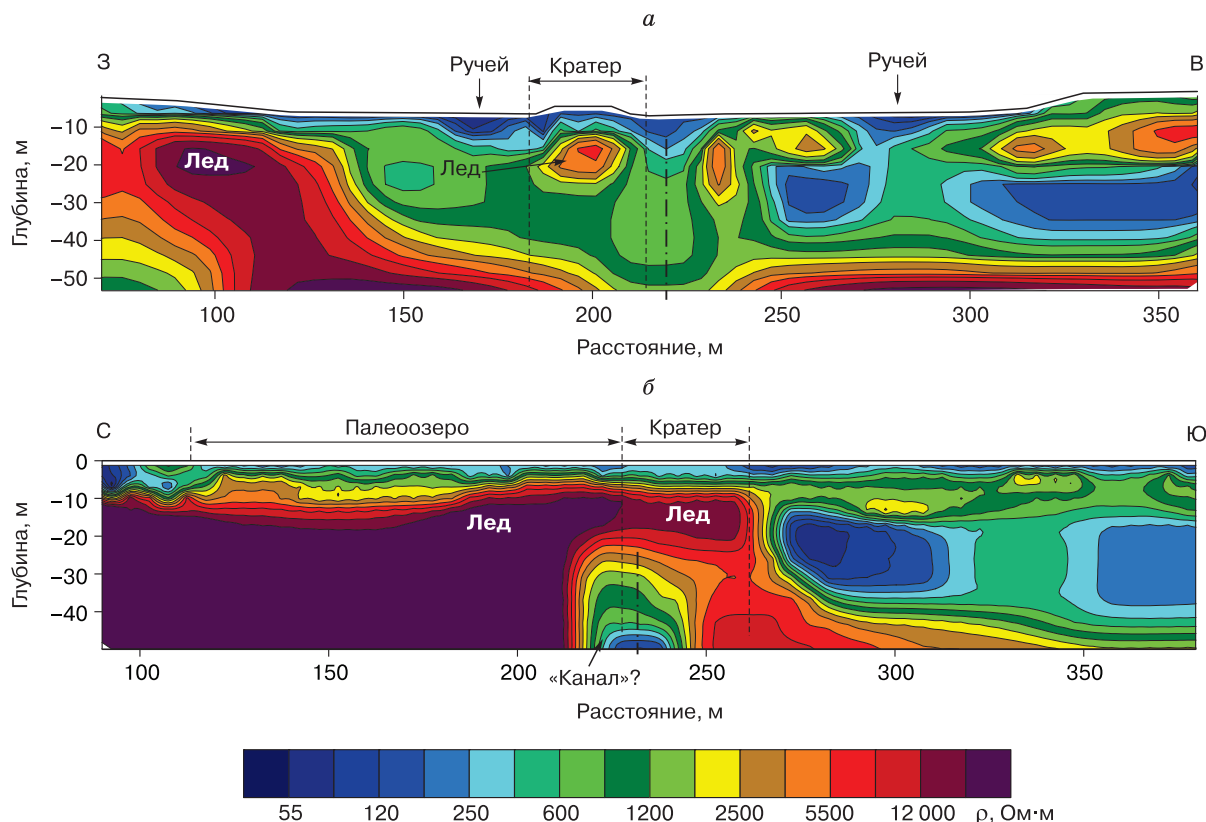


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по профилю 1 с южной (а) и профилю 7 с восточной (б) стороны кратера.

Штрихпунктирные линии – оси вертикальных аномалий пониженного УЭС.

электрическая 2D модель. Поэтому несоответствие геоэлектрических разрезов в точках пересечения профилей есть следствие трехмерной геологии. Для того чтобы понять, как все-таки устроена среда, решается 3D обратная задача и строится объемная модель. Однако при этом она генерализируется, исчезают мелкие детали, которые можно было ранее различить на двумерных разрезах. Объемная геоэлектрическая модель показывает нам общий характер распределения УЭС в среде.

На рис. 7 показана карта распределения УЭС, представляющая собой срез трехмерной модели по глубине 30 м. Северная часть площади характеризуется высоким УЭС (7000–100 000 Ом·м), что связано с распространением пластового льда в пределах палеоозера. К югу от кратера вытягивается линейная зона пониженных УЭС (250–800 Ом·м) субмеридионального простирания. Эта зона пространственно совпадает с долиной ручья и может отражать меньшую льдистость пород или большую глинистость.

На карте распределения УЭС видно, что кратер расположен несогласно геоэлектрическим структурам, не приурочен ни к одной из выделен-

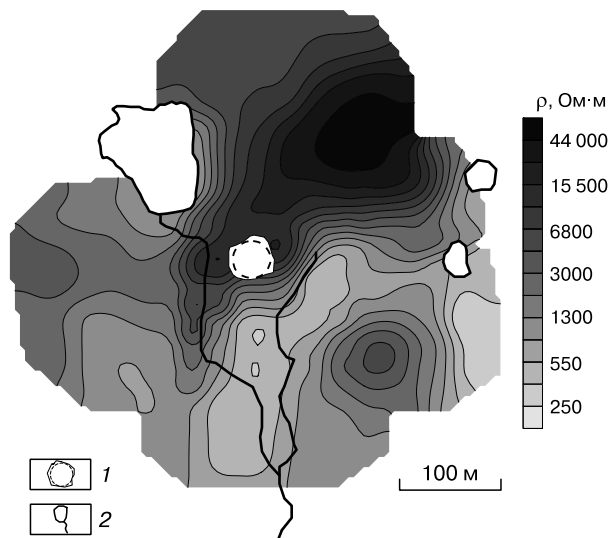


Рис. 7. Карта распределения удельного электрического сопротивления на глубине 30 м:

1 – кратер; 2 – гидросеть.

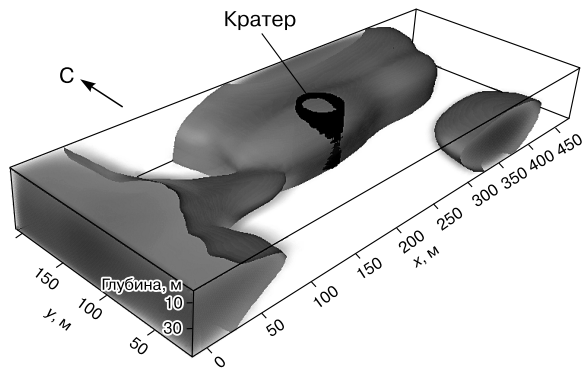


Рис. 8. Трехмерная геоэлектрическая модель среды.

Непрозрачная область – горные породы с УЭС более 2000 Ом·м.

ных аномалий и прорывает геоэлектрические границы. В то же время вполне вероятно, что детальности сетки при построении трехмерной геоэлектрической модели недостаточно для того, чтобы зафиксировать влияние кратера и подводящего канала на распределение УЭС в среде.

Трехмерная модель распределения УЭС в среде приведена на рис. 8. Высокольдистые породы и лед выделены изоповерхностью УЭС в 2000 Ом·м. Модель наглядно демонстрирует, что кратер образовался в краевой части комплекса пород высокого УЭС. По-видимому, с южной стороны кратера пластовый лед отсутствует.

Данные зондирования методом электротомографии позволяют сделать следующие выводы. Геоэлектрическое строение участка исследований крайне неоднородное, что вызвано разной льдистостью и литологическим составом пород. На геоэлектрических разрезах с южной и восточной сторон от кратера установлены вертикальные аномалии пониженного УЭС горизонтальной мощностью около 30 м. К югу от кратера выделяется линейная зона пониженных УЭС субмеридионального простирания. Кратер расположен несогласно геоэлектрическим структурам на границе комплексов пород высокого и низкого УЭС.

Зондирование становлением поля в ближней зоне

По данным ЗСБ, геоэлектрический разрез на глубину до 200 м через участок исследований аппроксимируется четырехслойным строением (рис. 9). Первый от поверхности слой имеет УЭС, равный 246–445 Ом·м, и мощность 50–65 м. Поляризуемость m первого слоя изменяется в пределах 0.12–0.27. Причем в области кратера отмечается контакт пород повышенной (0.27) и пониженной (0.13) поляризуемости. Второй слой аномально высокоомный с УЭС 400–880 Ом·м,

мощностью 7.5–20 м. Ниже, с глубины 55–80 м, залегает проводящий горизонт (7.5–11.0 Ом·м) большой мощности (70–100 м). Как правило, по данным ЗСБ кровля проводящего слоя выделяется с высокой точностью, поэтому глубина залегания выделенного низкоомного горизонта считается достоверной. Подстилающим является слой с еще более низким УЭС (3.4–5.1 Ом·м), залегающий на глубине 135–190 м. Низкие значения УЭС (3–10 Ом·м) объясняются засоленностью пород.

Анализ геоэлектрического разреза показывает, что кратер находится на границе двух геоэлектрических структур. Западная часть разреза в первом слое отличается повышенным УЭС по отношению к восточной. В области кратера отмечаются самые низкие значения УЭС в слое как с западной, так и с восточной стороны, что характерно для зоны разлома. График УЭС первого слоя по профилю зондирования приведен на рис. 10. На графике в центральной части профиля отчетливо проявляется минимум УЭС, показывающий наличие контакта геоэлектрических структур в месте возникновения кратера.

Большие электрические сопротивления и поляризуемость первого слоя объясняются повышенной льдистостью верхней части разреза и присутствием пластового льда. В данном случае пластовый лед с помощью метода ЗСБ выделить невозможно, что связано с особенностями метода.

В интервале глубин 60–80 м отмечается малоомный слой с аномально высоким УЭС (400–880 Ом·м). Аномально высокое значение может быть объяснено высокой льдистостью или большим количеством включений реликтовых газогидратов (клатратов метана). Как правило, газогидраты залегают в коллекторах, представляющих горизонты с прослоями песка или супеси с пониженным содержанием солей [Чувиллин, 2007]. Опесчанивание разреза, снижение засоленности и присутствие газогидратов сильно увеличивают УЭС слоя, что, вероятно, мы и наблюдаем на геоэлектрическом разрезе по данным ЗСБ.

Анализ литературных источников показал, что на площади Бованенковского НГКМ газопроявления, вызванные разрушением газогидратов, наиболее часто встречаются на глубине 60–80 м [Чувиллин и др., 1999; Чувиллин, 2007]. То есть положение слоя с аномально высоким УЭС в осадочной толще коррелирует с глубиной максимальной встречаемости газопроявлений в разрезе БНГКМ.

Нижезалегающий слой пород с УЭС 7.5–11.0 Ом·м интерпретируется как мерзлые нижне-среднеплейстоценовые морские отложения ямальской серии. Согласно данным бурения в аллювиальной пойме р. Мордыяха (скв. 610-П-3), эти суглинки имеют массивную криотекстуру, а на глубине 165 м вскрыта подошва ММП [Чувиллин и др., 1999].

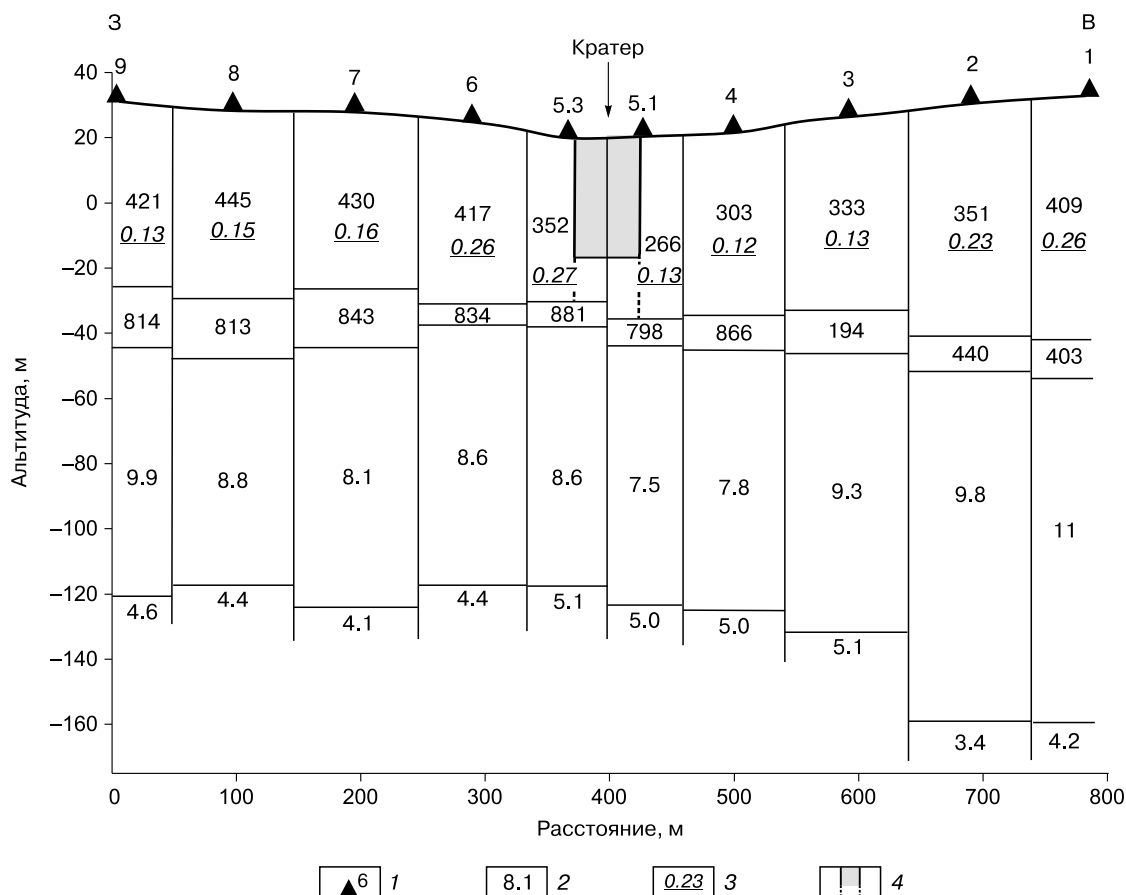


Рис. 9. Геоэлектрический разрез по данным зондирования становлением поля:

1 – пункты измерения процесса становления электромагнитного поля; 2 – удельное электрическое сопротивление пород, Ом·м; 3 – поляризуемость пород, д.е.; 4 – проекция кратера на разрез.

На геоэлектрическом разрезе на глубине 135–190 м выделяется кровля проводящего слоя, которую можно интерпретировать как фазовую границу вода–лед в грунтах, т. е. подошву многолетнемерзлой толщи. В связи с тем, что в засоленных морских суглинках и глинах фазовая граница не совпадает с нулевой изотермой, нижняя граница криолитозоны, которая залегает глубже, по данным электроразведки не выделяется.

На рис. 11 представлена геологическая интерпретация геоэлектрического разреза ЗСБ. На разрезе соотнесены геоэлектрические и геологические границы, показаны предполагаемые оси тектонических нарушений и граница фазовых переходов вода–лед. Тектонические нарушения обозначены в местах смены типа геоэлектрической модели, что выражается в резком изменении мощности или УЭС слоев разреза.

В результате электромагнитных зондирований методом ЗСБ установлено следующее. Верхняя часть разреза до глубины 60–80 м обладает

высоким УЭС, что характерно для высокольдистой многолетнемерзлой толщи и льдов. Кратер расположен на стыке геоэлектрических структур. На глубине 60–80 м предполагается насыщенный газогидратами горизонт. На глубине 135–190 м выделяется граница фазовых переходов вода–лед.

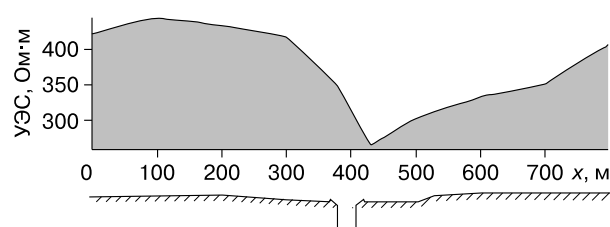


Рис. 10. График удельного электрического сопротивления первого слоя по профилю зондирования становлением поля.

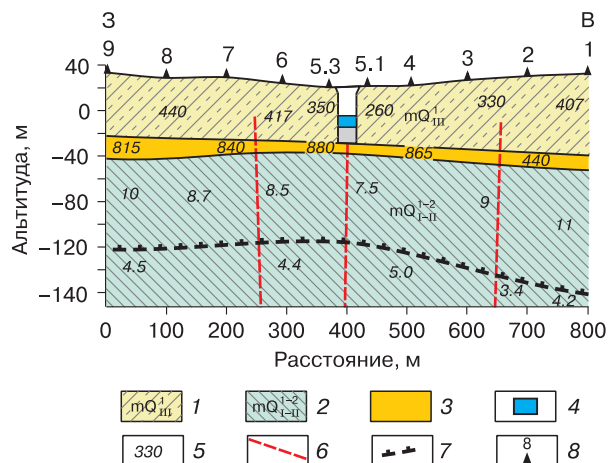


Рис. 11. Геологическая интерпретация геоэлектрического разреза по данным зондирования становлением поля:

1 – супеси и суглинки высокольдистые с пластовым льдом; 2 – суглинок, нижнесреднеплейстоценовые морские отложения ямальской серии; 3 – коллектор газогидратов; 4 – вода в кратере; 5 – удельное электрическое сопротивление пород; 6 – разлом; 7 – нижняя граница многолетнемерзлых пород; 8 – пункт измерения процесса становления электромагнитного поля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты комплексных геолого-геофизических исследований показали, что “Ямальский кратер” является природным геологическим новообразованием. В то же время причины и механизм его возникновения остаются неясными. Наиболее вероятный механизм образования кратера – газовый выброс. К этому же выводу пришли первые его исследователи [Богоявленский, 2014а,б; Лейбман, Плеханов, 2014]. Однако источник газа, создавшего избыточное давление, пока не установлен.

Анализ космоснимков высокого разрешения показал, что ранее на месте кратера был невысокий, практически идеально круглый бугор пучения диаметром основания 45–58 м [Кизяков и др., 2015; Космоснимок..., 2015]. Вполне вероятно, что силы, действующие снизу в течение длительного времени, сформировали положительную форму рельефа.

В ходе исследований установлено следующее.

Первое – по геоморфологическим признакам (долина ручья, разноуровневые поверхности) кратер приурочен к узлу пересечения тектонических нарушений субмеридионального, северо-восточного и северо-западного простираний. Наличие разломов подтверждается и геофизическими признаками: отрицательные аномалии магнитного поля, линейные понижения УЭС по данным ЭТ, контакт геоэлектрических структур в области

кратера на разрезе ЗСБ и сокращение мощности ММП.

Второе – в разрезе осадочной толщи на глубине 60–80 м выделен маломощный горизонт аномально высокого УЭС. В этом же интервале глубин на площади Бованенковского месторождения наиболее часто встречаются газопроявления реликтовых гидратов метана [Чувиллин, 2007].

Третье – на глубине 135–190 м по данным установлена граница, интерпретируемая как граница фазовых переходов вода–лед. Эта граница имеет наименьшую глубину залегания непосредственно под кратером.

Четвертое – анализ геологических данных показал, что кратер расположен над положительной геологической структурой (Южно-Муртинская), перспективной на углеводороды (газ).

Пятое – на месте кратера ранее располагался бугор пучения диаметром около 30 м.

Все эти факты указывают на эндогенные причины образования кратера.

Ранее авторами был предложен вероятный сценарий появления кратера, заключающийся в следующем: повышенный тепловой поток над залежью углеводородов привел к разрушению реликтовых газогидратов и возрастанию пластового давления в верхней части разреза, при этом выброс грунта произошел в самой ослабленной зоне – в месте пересечения тектонических разломов [Этов и др., 2014]. Однако, принимая во внимание опубликованную информацию [Лейбман, Плеханов, 2014; Кизяков и др., 2015; Leibman et al., 2014], мы скорректировали свои взгляды на происхождение кратера.

В качестве вероятных источников газа при пневматическом выбросе рассматриваются две версии. Согласно первой (глубинной) версии, кратер расположен над нефтегазоносной структурой, из которой по проницаемым зонам (разломам) происходит восходящая миграция углеводородных газов. Известно, что над залежами углеводородов (УВ) наблюдаются повышенный тепловой поток и миграция УВ к поверхности по разломам [Мехтиев, 1971]. Этот процесс вызывает уменьшение мощности мерзлых горных пород над залежами углеводородов [Дьяконов, 1958; Фотиев и др., 1974; Вожов, Сурнин, 1982]. Уменьшение мощности ММП было отмечено на участке исследований по данным ЗСБ. Мы предполагаем, что мигрирующий газ мог накапливаться в межмерзлотном талике под промерзающим палеоозером, а избыточное давление могло формировать бугор пучения.

По второй версии [Лейбман, Плеханов, 2014; Leibman et al., 2014], которую мы также не исключаем, источником газа является лавинообразное разложение гидратов метана, в результате которого произошел пневматический выброс грунта на поверхность. Как считает М.О. Лейбман, спуско-

вым механизмом для разложения газогидратов могло стать повышение температуры мерзлых грунтов, которое наблюдается в последние десятилетия из-за потепления климата. По геофизическим данным нами установлены признаки горизонта, насыщенного газогидратами. Для однозначного ответа на вопрос о присутствии газогидратов в разрезе необходимо специализированное бурение.

В докладе специалистов ООО ИТЦ “Газпром геологоразведка” (Тюмень), сделанном 28.11.2014 г. в Институте геоэкологии РАН (Москва), отмечалось, что под многими буграми пучения – булгуньяхами, по данным сейсморазведки, выделяются вертикальные аномалии типа разлома, уходящие на большую (3–5 км) глубину, и практически все системы хасыреев расположены в таких аномальных зонах. Исследователи не исключают механизм образования булгуньяхов за счет миграции глубинного газа к поверхности [Смирнов, 2014].

Нельзя исключать и классический механизм образования бугра пучения – булгуньяха, связанный с промерзанием несквозного талика под спущенным или высохшим озером [Достовалов, 1967]. Когда криогенное давление в замкнутой системе превышает сопротивление кровли разрыву, происходит взрыв с излиянием на поверхность напорных вод и выходом газа [Богомолов, Складьевская, 1969; Данилов, 1990]. В нашем случае бугор пучения располагался в краевой части промерзающего палеоозера. Вполне вероятно, что в межмерзлотном талике происходило накопление мигрирующего из глубины газа, а повышение температуры пород мерзлой кровли и льда уменьшило их прочностные свойства [Цытович, 1973], что привело к взрыву.

В работах [Богоявленский, 2014а,б] показано, что возникновение “воронок”, подобных “Ямальному кратеру”, достаточно частое (в геологическом и реальном масштабах времени) явление. Как правило, будущий выброс маркируется на местности бугром пучения. Важно понять, как отличить бугры пучения классической природы от бугров пучения, образованных в результате миграции газов. На сегодня непонятно, возможен ли оперативный прогноз взрыва бугра пучения и какие инженерные мероприятия по предотвращению взрыва можно применить. Нет однозначного определения источника газов: является ли их природа глубинной или же они образуются при разрушении реликтовых газогидратов в верхней части разреза. Для ответов на эти вопросы необходимы комплексные геолого-геофизические исследования в пределах существующих кратеров, бугров пучения и сверхглубоких озер, включая бурение с отбором керна льда и грунтов для подробного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что “Ямальский кратер” – это природное геологическое образование, являющееся, скорее всего, следствием газового выброса. Кратер расположен в отрицательной форме рельефа – долине ручья, на берегу палеоозера. На его месте ранее располагался бугор пучения.

С геофизических позиций кратер расположен в отрицательной аномалии магнитного поля, на границе комплексов пород высокого и низкого удельного электрического сопротивления. Радиационный фон без существенных аномалий. Данные электротомографии показывают, что на площади к северу от кратера развиты пластовые льды. К югу от него выявлена линейная субмеридиональная зона низкого УЭС, протягивающаяся вдоль долины ручья. По данным электромагнитных зондирований, на глубине 60–80 м предполагается наличие слоя с включениями газогидратов, а на глубине 135–190 м установлены признаки подошвы многолетнемерзлой толщи. Однако подобная интерпретация геофизических данных требует заверки бурением.

В качестве причин образования кратера высказаны две гипотезы. Согласно первой, это миграция глубинного газа из залежи и накопление его в межмерзлотном талике под палеоозером, с последующим выбросом. По второй гипотезе, избыточное давление образовалось в результате разрушения реликтовых газогидратов, вызванного повышением температуры ММП.

Следует признать, что по результатам исследований однозначного ответа на вопрос о причинах образования кратера получено не было.

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО “Газпром добыча Надым” С.Н. Меньшикову, заместителю начальника Инженерно-технического центра ООО “Газпром добыча Надым” А.Б. Осокину и персоналу центра за помощь в организации и проведении экспедиции.

Литература

- Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 8, с. 1282–1293.
- Астафьев Д.А., Скоробогатов В.А. Тектонический контроль газонефтеносности полуострова Ямал // Геология нефти и газа, 2006, № 2, с. 20–29.
- Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А. и др. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика, 2012, № 6, с. 54–63.
- Баулин В.В. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т. II. Геокриологические условия Бованковского месторождения / В.В. Баулин, В.И. Аксенов, Г.И. Дубиков. Тюмень, ИПОС СО РАН, 1996, 240 с.

Безукладнов В.А., Мавричев В.Г. Выявление аномалий типа “залежь” по магнитному полю // Геология нефти и газа, 1997, № 6, с. 25–29.

Богомолов Н.С., Складневская А.Н. О взрывах гидроклаколитов в южной части Читинской области // Наледи Сибири: Сб. статей. М., Наука, 1969, с. 127–130.

Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть, 2014а, № 9, с. 13–18.

Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2 // Бурение и нефть, 2014б, № 9. URL: <http://burneft.ru/archive/issues/2014-10/1> (дата обращения: 13.03.2015).

Вахромеев Г.С. Петрофизика. Учеб. для вузов / Г.С. Вахромеев, Л.Я. Ерофеев, В.С. Зинченко, Г.Г. Номоконова. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1997, 462 с.

Вожов В.И., Сурнин А.И. Закономерности распространения многолетнемерзлых пород на Сибирской платформе // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы. Новосибирск, СНИИГГиМС, 1982, с. 5–18.

Данилов И.Д. Подземные льды / И.Д. Данилов. М., Недра, 1990, 137 с.

Достовалов Б.Н. Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 403 с.

Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири / Г.И. Дубиков. М., ГЕОС, 2002, 246 с.

Дьяконов Д.Н. Геотермия в нефтяной геологии / Д.Н. Дьяконов. М., Гостоптехиздат, 1958, 277 с.

Кизяков А.И., Соношкин А.В., Лейбман М.О., Зинин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 15–25.

Козлов Е.П., Черданцев С.Г., Юмачиков Ф.С. Геологическое строение и полезные ископаемые западной части полуострова Ямал // Инф. отчет о результатах ГДП листов R-42-VII-IX, XIV-XV м-ба 1:200 000. Бованенковский объект / Тюм. фил. ФБУ “ТФГИ по Уральскому федеральному округу”. Тюмень, 1999, 269 с.

Космоснимок [Электронный ресурс]. URL: <https://www.here.com/?map=69.97111,68.37042,19,satellite&msg=Ямальский%20район> (дата обращения: 07.02.2015).

Костенко Н.П. Геоморфология / Н.П. Костенко. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, 379 с.

Лейбман М.О., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования // Холод’Ок, 2014, № 2 (12), с. 9–15.

Мехтиев Ш.Ф. Геотермические исследования нефтяных и газовых месторождений / Ш.Ф. Мехтиев, А.Х. Мирзаджанзаде, С.А. Алиев. М., Недра, 1971, 215 с.

Полуостров Ямал / Отв. ред. В.Т. Трофимов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 280 с.

Подурушин В.Ф. Тектоника фундамента и ее влияние на формирование газового потенциала полуострова Ямал // Вести газ. науки, 2011, № 3 (8), с. 65–72.

Санников Г.С. Картометрические исследования термокарстовых озер на территории Бованенковского месторождения, полуостров Ямал // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 30–37.

Скоробогатов В.А. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала / В.А. Скоробогатов, Л.В. Строганов, В.Д. Копеев. М., Недра-Бизнесцентр, 2003, 343 с.

Смирнов А.С. Поверхностные проявления флюидодинамических процессов Земли // Семинар Сообщества молодых мерзлотоведов России № 29 “Загадочная воронка на Ямале – что это на самом деле?” (Москва, 28.11.2014 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://geoenvironment.ru/index.php/ru/news/seminary/284/763> (дата обращения: 09.03.15).

СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований. М., Госстрой РФ, 2004, 58 с.

Фотиев С.М. Геокриологические условия Средней Сибири / С.М. Фотиев, Н.С. Данилова, Н.С. Шевелева. М., Наука, 1974, 148 с.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. Пушкино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.

Чувиллин Е.М. Строение и свойства пород криолитозоны Южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения / Е.М. Чувиллин, Е.В. Перлова, Ю.Б. Баранов и др. М., ГЕОС, 2007, 137 с.

Чувиллин Е.М., Якушев В.С., Перлова Е.В. и др. Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (полуостров Ямал) // Докл. РАН, 1999, т. 369, № 4, с. 522–524.

Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Учеб. пособие / Н.А. Цытович. М., Высш. шк., 1973, 488 с.

Эпов М.И., Ельцов И.Н., Оленченко В.В. и др. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук, 2014, № 5 (59), с. 14–23.

Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaya I.D. New permafrost feature – deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia, as a response to local climate fluctuations // Geography, Environment, Sustainability, 2014, vol. 7 (4), p. 68–80.

Loke M.H., Acworth I., Dahlin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys // Explorat. Geophys., 2003, vol. 34, p. 182–187.

Поступила в редакцию
23 марта 2015 г.