

## Применение электротомографии при прогнозе развития опасных экзогенных процессов на объектах инфраструктуры Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения

В.В.Оленченко

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН*

А.Б.Осокин

*ООО «Газпром Добыча Надым»*

### Реферат

Представлены результаты опытно-методических исследований методом электротомографии на участках развития опасных экзогенных процессов в пределах объектов инфраструктуры Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Показано, что контрастное различие по удельному электрическому сопротивлению льда и вмещающих пород дает основание применять экспрессную технологию электротомографии для картирования подземных льдов и прогноза направления и масштабов развития опасных экзогенных процессов. Сделан вывод о том, что исследования методом электротомографии следует отнести к способам оценки влияния опасных экзогенных процессов наряду с дешифрированием материалов аэросъемки, рекогносцировочными маршрутными исследованиями, геодезическими и температурными замерами.

**Ключевые слова:** опасные экзогенные процессы; лёд; электротомография.

## The Application of Electrical Resistivity Tomography in the Evaluation of the Degree Influence of Hazardous Exogenous Processes on the Infrastructure of the Bovanenkovo Deposit

V.V.Olenchenko

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences*

A.B.Osokin

*Gazprom*

### Abstract

It is presented the results of experimental and methodological studies observed by electrical resistivity tomography (ERT) in the areas hazardous exogenous processes within the infrastructure Bovanenkovo deposit. It is shown that the contrast difference in resistivity of ice and rock suggests apply express technology ERT for mapping underground ice and forecast the direction and extent of development of dangerous exogenous processes. It is noticed that the result of the use of ERT should be considered a way to measure the impact of hazardous exogenous processes along with interpretation of aerial photos, route reconnaissance surveys, geodetic and temperature measurements.

**Key Words:** dangerous exogenous processes; underground ice; electrical resistivity tomography.

### Введение

Для территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (БНГКМ) характерно широкое распространение мерзлотно-геологических процессов, развитие которых обусловлено оттаиванием текстурообразующего льда и крупных его залежей под воздействием изменений условий поверхностного теплообмена, многолетнего потепления климата, концентрации стока поверхностных и грунтовых вод, а также техногенной нагрузки на ландшафты при хозяйственном освоении.

Эти процессы представляют опасность для объектов вспомогательной инфраструктуры – трасс газосборных коллекторов, автодорог, линий электропередач. Для борьбы с опасными экзогенными процессами в ООО «Газпром добыча Надым» разработан план мероприятий по инженерной защите объектов обустройства

Бованенковского НГКМ от воздействия опасных экзогенных процессов. В рамках реализации этого плана силами службы геотехнического мониторинга Инженерно-технического центра (ИТЦ) ООО «Газпром добыча Надым» проводятся аналитические исследования динамики опасных экзогенных процессов на территории газового промысла № 2 (ГП-2) БНГКМ и их влияния на объекты обустройства.

Для повышения эффективности выполняемых работ в составе комплексных исследований был опробован современный электроразведочный метод геофизики - электротомография. Главной целью работы являлась разработка оперативных способов получения объективных данных о прогнозе развития опасных экзогенных процессов на объектах обустройства БНГКМ для принятия эффективных решений по инженерной защите объектов и территорий и определения приоритетности их реализации.



## Характеристика объекта исследования

В течение 2012-2013 гг. службой геотехнического мониторинга Инженерно-технического центра ООО «Газпром Добыча Надым» были проведены исследования нарушенности земель и оценка динамики опасных экзогенных процессов (ОЭП) в пределах трасс линейно-протяжённых объектов ГП-2 БНГКМ.

Согласно техническому заключению по результатам исследований на территории БНГКМ выделено 150 участков развития экзогенных процессов, характеризующихся высокой и средней степенью рисков потери надежности инженерных сооружений [Рыжакова 2014].

Геофизические исследования методом электротомографии выполнены на четырёх участках развития ОЭП, представляющих собой две подъездные автодороги к кустам газовых скважин, трассу газосборного коллектора, и трассу высоковольтной линии электропередач (ЛЭП). Ниже приводится краткая характеристика одного из участков исследований.

Участок исследований расположен в пределах подъездной автодороги к кусту газовых скважин. Из-за вытаивания пластовых льдов здесь развиты процессы термокарста и термоэрозии, формируются оползни-сплывы (рис. 1). Процессы находятся в активной стадии развития со скоростью 8-9 м/год (в 2011-2013 г.г.).



Рис. 1. Термоэрозия грунтов и образование оползней - сплывов из-за вытаивания пластового льда вблизи подъездной автодороги (аэрофотоснимок)

Степень рисков потери надежности инженерных сооружений оценивается как высокая. По данным бурения скважины по оси проектируемой дороги инженерно-геологический разрез характеризуется следующим образом: 0,0-0,1 м – торф водонасыщенный; 0,1-0,4 м – песок пылеватый, средней степени водонасыщенности; 0,4-1,2 м – песок пылеватый водонасыщенный; 1,2 - 4,3 м – суглинок мерзлый слабльдистый,  $i=0,16$ ; 4,3-4,6 м – суглинок мерзлый льдистый,  $i=0,25$ ; 4,6-7,5 м – глина мерзлая, слабльдистая,  $i=0,16$ ; 7,5-8,0 м – лёд. Температура

грунтов в слое нулевых годовых колебаний составляет минимум от 3 °С до минус 5 °С.

Таким образом, по данным бурения было установлено, что в основании дороги залегают льдистые грунты и лёд неизвестной мощности и неустановленными границами распространения.

## Метод и методика исследований

В качестве метода геофизических исследований на участке исследований применялась современная модификация метода вертикального электрического зондирования – электротомография (ЭТ) [Бобачёв Горбунов 2005, Loke 2009].

Электротомография относится к группе методов сопротивления, основанных на законе Ома, и сочетает в себе элементы вертикального электрического зондирования и профилирования.

ЭТ включает оптимизированную методику полевых наблюдений многоэлектродными установками и соответствующие технологии обработки и интерпретации полевых данных. Интерпретация проводится в рамках двумерных и трехмерных моделей, а исследуемые среды могут значительно отличаться от «классических» горизонтально-слоистых.

На участке исследований выполнены площадные зондирования ЭТ, с целью последующего построения трёхмерной геоэлектрической модели. Измерения выполнены по 6 параллельным профилям. Расстояние между профилями составляло 20-25 м при длине профилей 235 м с шагом по профилю 5 м. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже. При измерениях применялась многоэлектродная аппаратура Тундра-48, являющаяся модификацией прибора «Скала-48» [Балков и др. 2012].

Количественная интерпретация данных выполнялась при помощи программного обеспечения Res2Dinv и Res3Dinv [Loke 2009]. В результате были построены геоэлектрические разрезы, трёхмерные геоэлектрические модели и карты распределения удельно го электрического сопротивления (УЭС) на разных глубинах (карты изоум) и проведена их геологическая интерпретация.

## Результаты исследований

Статистический анализ распределения УЭС грунтов геоэлектрического разреза вдоль подъездной автодороги показал, что распределение носит полимодальный характер - выделяется три значимых максимума. Первый расположен в окрестностях УЭС 200 Ом·м, второй – 1000 Ом·м и третий – более 10000 Ом·м. Согласно [Фролов 1998, СП 11-105-97] для мерзлых грунтов с температурой от минус 3 °С до минус 5 °С такие УЭС характерны для глин, суглинка и льда. Таким образом, разрез вдоль профиля представлен преимущественно глинами с подчинённым количеством суглинка и содержит значительное количество льда. Разрез по скважине, пробуренной на участке, подтверждает адекватность

геологической интерпретации электроразведочных данных.

На рисунке 2 показан геоэлектрический разрез вдоль автодороги, построенный по результатам 2-D инверсии. В верхней части разреза выделяются аномалии высокого УЭС (1500-7000 Ом·м) характерной формы, вызванные пластовым льдом. Характер распределения УЭС в разрезе говорит о том, что пластовый лёд распространяется вдоль дороги не сплошным слоем, что может показаться при анализе аэрофотоснимка местности (см. рис. 1).

В центральной части профиля (инт. 90-120 м) выделяется интенсивная аномалия высокого УЭС (до 15000 Ом·м), вызванная мощной ( $h=28$  м) жилой льда. Напротив этой аномалии расположена голова оврага.

Хорошо видно, что инженерно-геологическая скважина вскрывает относительно маломощный (2,5-3 м) пласт льда, не связанный с жилой.

По результатам 3-D инверсии была построена трёхмерная геоэлектрическая модель участка, срез которой по глубине 15 м показан на рисунке 3б. На карте распределения УЭС видно, что овраг развивается в сторону линейно вытянутой аномалии высокого сопротивления, вызванную мощной жилой льда. Положение этой аномалии в плане совпадает с геоморфологической структурой – линейным понижением в рельефе, заметным на космоснимке (рис. 3а). Скорее всего, такая линейно вытянутая форма рельефа развилась над ледяной жилой. Визуальный осмотр местности показал, что данное понижение в рельефе не является временным водотоком и расположено на водоразделе.

Таким образом, по геофизическим данным было установлено, что пластовый лёд в пределах участка исследований не имеет сплошное распространение. Скважина, вскрывающая лёд, попала в локальную линзу, и данные бурения создают ложное представление о сплошном распространении пластового льда в пределах участка развития ОЭП. Опасные экзогенные процессы развиваются вдоль линейно вытянутой аномалии высокого сопротивления, связанной с жильным льдом. Горизонтальная мощность ледяной жилы, секущей автодорогу, оценивается в 30 метров.

## Обсуждение результатов

Результаты опробования электротомографии показали, что данная технология может применяться в качестве оперативного метода получения объективных данных о прогнозе развития опасных экзогенных процессов на объектах газодобычи.

Для оценки рисков потери надежности инженерных сооружений в ИТЦ были разработаны критериальные признаки:

- качественные признаки – близость к инженерному сооружению, интенсивность (скорость протекания) процесса;
- количественные признаки – наличие изменений пространственного положения конструктивных элементов (деформаций фундаментов и надфундаментных конструкций), отклонение от проектного температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований, увеличение глубины сезонно-талого слоя (СТС).

Технология электротомографии может быть использована для оценки как качественных, так и количественных признаков. Так по распределению УЭС в плане можно оценить близость пластовых льдов к инженерному сооружению, а характерные аномалии пониженного УЭС позволят оценить отклонения в температурном режиме многолетнемерзлых грунтов и определить участки увеличения глубины СТС. В случае если инженерное сооружение расположено в зоне влияния ОЭП, и попадает в контуры аномалии высокого УЭС, то степень риска поражения инженерного сооружения следует считать достаточно высокой.

Данные ЭТ позволят точнее спрогнозировать вовлечение инженерного сооружения в зону влияния процессов в ближайшие 5-10 лет эксплуатации объекта и тем самым перевести степень риска из средней в высокую либо в низкую.

Безусловно, результаты электротомографии участков развития ОЭП необходимо использовать для разработки экстренных мероприятий по инженерной защите, направленных на снижение рисков развития аварийных ситуаций и минимизацию возможных ущербов, а также для разработки превентивных мероприятий по инженерной защите сооружений.

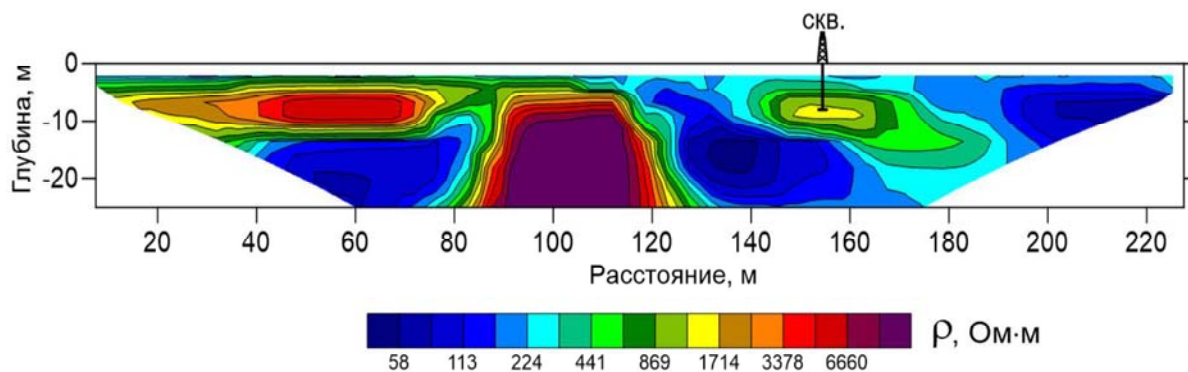


Рис.2. Геоэлектрический разрез вдоль автодороги на участке развития

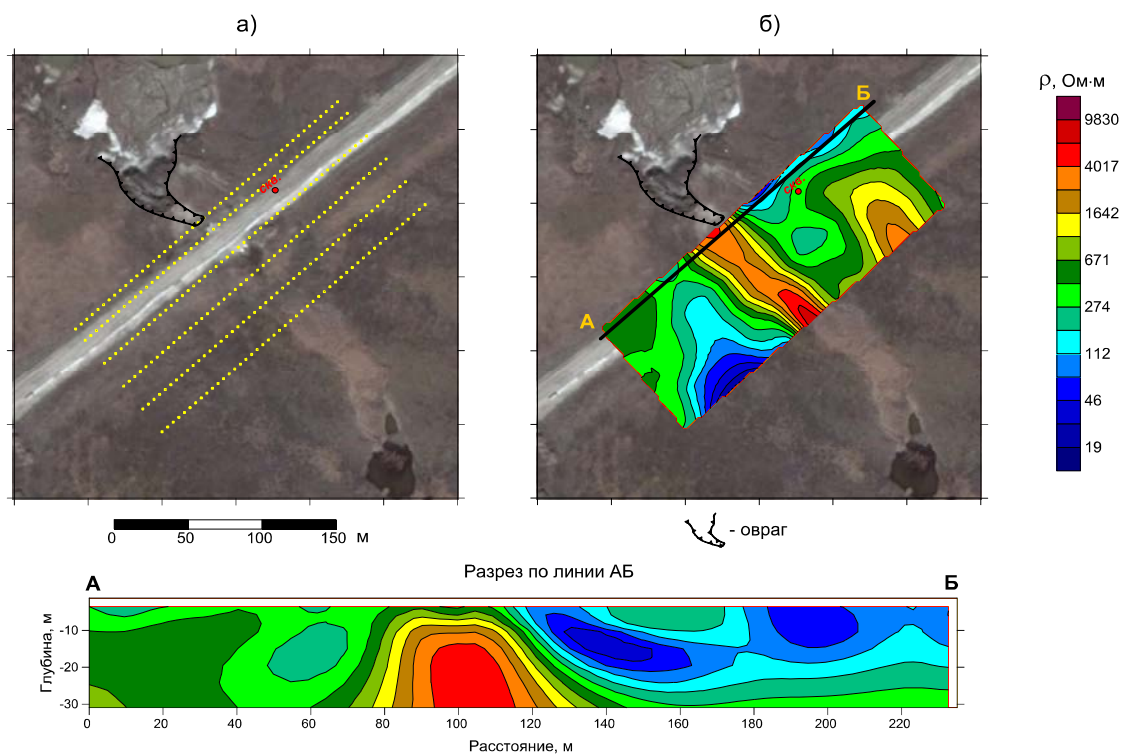


Рис. 3. Космоснимок местности, расположение профилей и скважины (а), карта изограм по глубине 15 м (б) и геоэлектрический разрез по линии АБ по результатам 3-D инверсии

## Выводы

В результате опытно-методических работ было установлено, что к способам оценки влияния опасных

экзогенных процессов наряду с дешифрированием материалов аэросъемки, рекогносцировочными маршрутными исследованиями, геодезическими и температурными замерами следует отнести и исследования методом электротомографии. При этом решаемые задачи, позволяющие оценить риски поражения инженерного сооружения опасными экзогенными процессами и сделать прогноз их развития, сводятся к следующему:

- определение состава, мощности, льдистости четвертичных отложений;
- выявление литологического строения массива горных пород и зон повышенной льдистости;
- оконтуривание подземных льдов;
- определение глубины залегания кровли многолетне-мерзлых грунтов (мощности сезонно-талого слоя);
- определение состава, состояния и свойств мерзлых грунтов в массиве, их изменений (во времени и пространстве);
- изучение криогенных процессов и их динамики;
- проведения мониторинга опасных криогенных процессов.

Для получения максимально полной информации по объекту необходимо проведение площадных измерений ЭТ с целью построения трёхмерной геоэлектрической модели участка.

Контрастное различие по удельному электрическому сопротивлению льда и вмещающих пород дает основание применять экспрессную технологию электротомографии для

картирования подземных льдов и прогноза направления и масштабов развития опасных экзогенных процессов. Для обеспечения достоверности и точности интерпретации результатов геофизических исследований результаты электротомографии необходимо привязывать к инженерно-геологическим скважинам и другой априорной информации по участку работ.

## Литература

- Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика, 2012, №6, с. 54-63.
- Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методика, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005, N12, с. 52–54.
- Рыжакова О.А. Техническое заключение по оценке динамики опасных экзогенных процессов в пределах трасс линейно-протяженных объектов ГП-2 Бованенковского НГКМ (по результатам работ за 2013 год) // Техническое заключение ИТЦ ООО «Газпром Добыча Надым». Отв. исп. О.А. Рыжакова. Надым. 2014.– 19 с.
- Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. — Пушино. ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, — 515 с.
- СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. - М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.
- Loke M.H. 2009, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual, IRIS Instruments.