

# Особенности и экономическая эффективность использования электроразведочного метода переходных процессов для инженерно-геологических изысканий в районах Севера и Арктики России

В. И. Павленко, доктор экономических наук,  
Ю. В. Коротков, кандидат геолого-минералогических наук,

Архангельский научный центр Уральского отделения  
Российской академии наук

*С помощью индукционных методов электроразведки, в частности, метода переходных процессов, можно получить детальное представление о верхней части разреза в сложных геологических условиях. Такого рода информация позволяет правильно оценивать несущую способность и устойчивость массивов горных пород в пределах площадок под возведение инженерных сооружений (промышленных, гражданских, гидротехнических, транспортных и др.) как на стадии проектирования, так и в процессе их эксплуатации. Экономическая эффективность работ определяется не только значительным сокращением средств на изыскания и сроков их проведения, но и существенным снижением рисков возникновения техногенных катастроф и связанных с ними затрат на непредвиденные расходы по ликвидации их последствий.*

**Ключевые слова:** криолитозона, инженерные изыскания, геофизические методы исследований, индукционная электроразведка, метод переходных процессов, геоэлектрический разрез, геоэлектрический срез по глубине, электромагнитный отклик геологической среды, экономическая эффективность, экономические риски.

Поступила в редакцию 19.11.2012

Север и Арктика России вызывают повышенный интерес в связи с перспективами развития добывающих отраслей и производств. Освоение макрорегиона сопровождается интенсивным строительством, связанным с добычей, первичной переработкой и транспортировкой энергетического и минерального сырья в другие районы. Природно-климатические условия северных и арктических районов отличаются ярко выраженной спецификой, поэтому чрезвычайно важно, чтобы любое техногенное воздействие осуществлялось в динамическом сочетании с природными явлениями и процессами, характерными для конкретных территорий.

Сложные условия в первую очередь обусловлены практически повсеместным распространением вечной мерзлоты, охватывающей толщи пород от первых единиц до сотен метров в глубину. Многолетнемерзлые грунты находятся в твердом состоянии, поэтому при строительных работах нередко рассматриваются как несущая опорная часть продуктивной толщи пород. В то же время большое разнообразие криогенных и литологических

условий небольшой протяженности в пределах конкретных геокриологических единиц, связанных с локальными таликами в сплошном развитии мерзлоты или с участками многолетнемерзлых пород в условиях прерывистой мерзлоты, накладывает неоднозначный отпечаток на состояние грунтов. Естественные и техногенные талики близ поверхностной (15—25 м) части криолитозоны создают наибольшие проблемы при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения.

Следует отметить, что талики могут быть небольших размеров и при этом находиться в различной степени «активности». Незнание или игнорирование этого при строительных работах, как правило, отрицательно сказывается на прочностных свойствах возводимых сооружений. Примеров проявления этого достаточно много: проседания грунтов с переносом сооружений, выпирания, провалы и наклоны свай, искривления линейных участков трубопроводов и, с течением времени, обрушение стен сооружений, разрывы трубопроводов и т. д. Поэтому вопросы типизации разреза мерзлых

грунтов и определение инженерно-геологических условий исключительно важны для планирования возведения строительных сооружений и принятия необходимых проектных решений. Особенно важно иметь объективное представление о состоянии толщи пород, охватывающей деятельный слой мощностью 0,3—3,0 м и частично подстилающие породы на глубину до 20—30 м. Эти породы чаще всего относительно устойчивы по отношению к перекрывающим их отложениям. Соответствующая информация необходима в первую очередь для оценки несущей способности и устойчивости массивов горных пород на конкретных строительных площадках и может быть получена на основе детального изучения оснований проектируемых наземных инженерных сооружений (промышленных, гражданских, гидротехнических, транспортных и др.) с тщательным изучением геологического разреза в глубину и по плоскости.

Методически правильно иметь информацию не дискретного характера, сформированную на основе отдельных точечных наблюдений, а создаваемую непрерывными (по линейным участкам) и площадными измерениями на отдельных площадках, что может быть достигнуто только с использованием современных геофизических методов.

Криолитозона — достаточно сложная среда для исследования геофизическими методами, но опыт показывает, что проблемы применения геофизических методов для изучения мерзлоты в целом решаемы. Как правило, чаще всего требуется «индивидуальный» подход к технологиям, методам их реализации, способам обработки и интерпретации полученных данных. При этом «индивидуальность» удачных решений может считаться оправданной, в том числе и с экономической точки зрения, так как подобного рода информация способствует обеспечению надежности возводимых сооружений, снижению вероятности возникновения рисков, позволяя исключать значительные затраты на предотвращение возможных разрушений.

Эффективность геофизических технологий определяется не только точностью измерений, но и процедурой их обработки, т. е. тем, насколько точно соответствует теоретическая модель реальной среде. Результат зависит от правильности выбора геофизического метода, аппаратного средства, пакета программ и способа ведения исследований. При выборе технологии геофизических исследований важен предварительный анализ чувствительности и информативности различных компонент геофизического поля к неоднородностям геологического разреза. Такой анализ, как известно, в общем случае аналогичен анализу неоднородностей по физическим свойствам. Выбор методики и системы наблюдения обусловлен требованием рентабельности положительного решения конкретных геологических задач при изучении разреза по вертикали и/или латерали в отношении к неоднородностям. Для этого лучше всего поиск проводить не по эмпирическому принципу (сравнения с каким-то эталонным аналогом), а по более

свободному пути, когда любое отклонение в разрезе отслеживается с обязательным объяснением возможного его происхождения. Процесс и методике измерения необходимо корректировать или менять в ходе изучения конкретной аномалии по направлению отслеживания максимального градиента нарушенности [8]. В настоящее время это вполне возможно делать и на сложная с геологической точки зрения объектах, подключая детальное изучение с более широким комплексом необходимых мероприятий в процессе приема и обработки полевого материала.

В Архангельском научном центре Уральского отделения РАН создано и успешно работает специальное подразделение, принимающее участие в инженерных изысканиях на территории сложных геологических районов Севера и Арктики России. Подразделение активно проводит геофизические исследования в рамках реализации различных производственных проектов в Ненецком и Ямало-Ненецком автономных округах, Архангельской области, Республике Коми, Республике Саха (Якутия) и других субъектов Федерации. Важно подчеркнуть, что при этом используются собственные отработанные и постоянно совершенствующиеся технологии по изучению криолитозоны, с выявлением различного рода таликов. Кроме того, разрабатываются и используются технологии, позволяющие выявлять проявления тектонических нарушений в верхней толще осадочных отложений, обнаружить и отследить карстовые нарушения скрытого типа на небольших глубинах (до 50 м), технологии изучения состояния грунтов, находящихся под застройкой техническими сооружениями, а также по многим другим направлениям.

Существование неоднородностей вносит своеобразную деструктуризацию в слоистое-уравновешенное залегание осадочных отложений и при этом имеет секущий субвертикальный характер в контактовой части. Поэтому основной акцент в исследованиях может быть сделан на использовании так называемого структурного критерия, а в качестве эффективного средства измерения должен использоваться такой геофизический метод, который обладает наибольшей чувствительностью к вертикальным неоднородностям. Чтобы получить отличия такой неоднородности от общего фона геологической среды, в первую очередь необходимо иметь четкое представление о строении разреза по вертикали. В достижении максимальной геологической и экономической эффективности изучения криогенной обстановки наиболее перспективными могут быть индукционные методы электроразведки, к тому же использование незаземленных линий (петель) позволяет проводить работы в любое время года и в любых геологических условиях.

Наибольшей чувствительностью к горизонтальным геоэлектрическим границам среди компонент электромагнитного поля обладает его ортогональная компонента  $B_z(t)$  (магнитная индукция). Поэтому для решения задач с целью расчленения

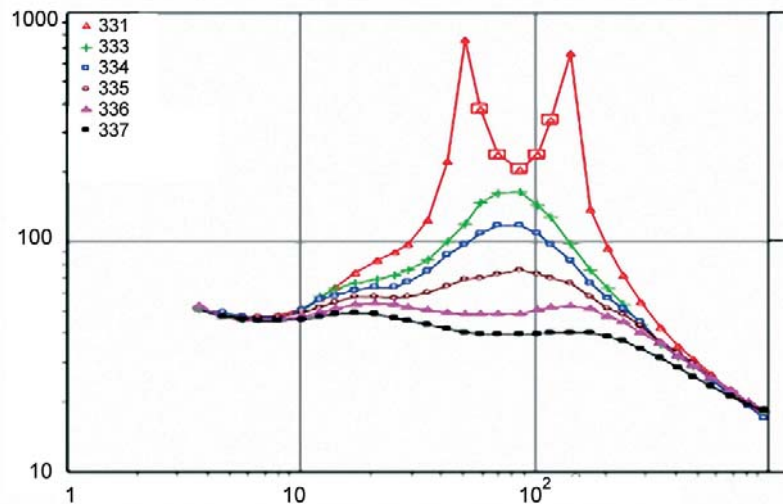


Рис. 1. Графики кривых кажущегося сопротивления по шести точкам наблюдения (на экране управляющего компьютера), отображающие переходную криолитозону от мерзлого состояния к талому

знака переходного процесса (кривые 333, 334), что тоже должно учитываться при обработке материалов измерений. Породы, находясь в мерзлом состоянии, имеют высокие значения удельного электрического сопротивления, при этом мерзлота сглаживает прак-

разреза по вертикали наиболее информативным, как показал опыт, является электроразведочный метод, основанный на измерении этой величины.  $B_z(t)$  — переходная характеристика электромагнитного поля, на изучении которой основаны методы зондирования становлением. Для решения подобных задач наилучшим образом на, наш взгляд, подходит электроразведочный метод зондирования становлением поля в модификации метода переходных процессов (МПП) с использованием технологии TEM-FAST. А в качестве эффективного технического средства измерения переходных процессов неустановившегося поля в этой технологии может использоваться аппаратура TEM-FAST 48HPC компании «Electro Magnetic Research» совместного производства России и Нидерландов и специальный пакет программ обработки данных измерения TEM-RESEARCHER.

Вполне очевидно, что геологическая среда неоднородна. Поэтому важно соблюдать условия возбуждения и приема электромагнитного сигнала, которые должны быть оптимальными для решения конкретной геологической задачи. Большое значение имеет характер источника возбуждения электромагнитного поля. Для этого в электроразведке существует большое количество технологических способов и приемов, позволяющих делать необходимый выбор применительно к решению конкретных задач.

Многолетнемерзлые и сезонного промерзания породы сильно охлаждены и имеют повышенную льдистость, что определяет высокие значения электрического сопротивления (более 1000 Ом·м) и может служить индикатором для выявления многолетнемерзлых пород, проявляясь на результатах измерений в виде кратковременных процессов индукционно вызванной поляризации (IP) регистрируемых часто с двойной сменой знака кривых  $rk(t)$  (рис. 1, кривая 331).

Источник поляризации обусловлен диэлектрической релаксацией полярных молекул воды в мерзлом состоянии. В некоторых случаях влияние этих эффектов может проявляться только в повышении величин кажущегося сопротивления  $rk$  без смены

практически полностью все границы между схожими породами (рис. 2). На рис. 2 приведен один из примеров разреза, где имеется многолетняя мерзлота, с равномерным ее распространением. Лишь самая верхняя часть на разрезе в пределах 3,0—3,5 м находится в талом состоянии, так как относится к слою посезонно переменного состояния (работы проводились в летнее время). На данном разрезе отсутствуют локальные таликовые зоны, и разрез в целом можно считать однородным, рассматривая при этом мерзлоту в качестве фона, а всякое отклонение в нем как аномальное проявление.

Предпосылкой для успешного выявления и изучения таликов электроразведочными методами является обводненность пород. На геоэлектрических разрезах это проявляется значительным понижением сопротивления на высокоомном фоне, и, соответственно, выделяемые таким образом участки могут быть отнесены к таликам. В технологии TEM-FAST программой предусмотрено отображение на экране управляющего компьютера шести последних измерений (см. рис. 1), что позволяет достаточно точно отслеживать момент вступления в аномальную зону. Кривые  $rk(t)$  отражают характерное изменение сопротивления пород в зависимости от литологического состава и от их физического состояния на момент измерения. На рис. 1 кривые 331, 333, 334 и, возможно, частично 335 осложнены эффектом IP и характеризуют мерзлотное состояние пород на некоторой глубине с постепенным оттаиванием по направлению выбранного маршрута. Остальные кривые (336 и 337) характеризуют многослойный разрез с низкими значениями сопротивления, в данном случае присущий талой зоне, причем кривая 337 характеризует сквозной талик (с отсутствием поляризационных свойств у пород), образовавшийся в условиях зарегулированного стока поверхностных вод. Геоэлектрические разрезы в таких случаях имеют характерные аномальные отклонения (рис. 3 и 4) в отличие от разрезов с отсутствием таковых (рис. 2).

На рис. 3 на фоне высокоомного (более 1000 Ом·м) массива пород хорошо выделяется зона

с относительно низким значением электрического сопротивления (порядка 30—40 Ом·м). Более того, внутри этой зоны отмечается локальный субвертикального направления проводник в виде сквозного прохода в толще мерзлых пород. С поверхности земли место проявления этой зоны совпадает с заболоченной и интенсивно заросшей кустарником депрессией рельефа. Рассматриваемая зона находится в понижении рельефа и вытянута по направлению распространения ручья (в понижении имеется небольшой ручей).

На втором геоэлектрическом разрезе (рис. 4) хорошо проявилась зона локального оттаивания, которая имеет сквозное проникающее положение по отношению к мерзлой толще пород. С поверхности эту зону практически невозможно визуально определить, и лишь в одном месте (в кустарнике) наблюдается выход воды из земли. Поэтому на практике такие участки чаще всего пропускаются, и бывает так, что они просто заглаживаются или засыпаются насыпным грунтом, оставаясь при этом очень опасными для возведения строительных сооружений.

В отличие от сквозных таликов простые талые зоны (висячие), так называемые субэдральные талики на геоэлектрических разрезах проявляются в виде различной конфигурации «врезов», относительных проводников электрического тока в однородный массив мерзлых (высокоомных) пород (рис. 5), и это встречается очень часто.

Ресурсы водоносного горизонта такого талика формируются в летнее время за счет инфильтрации атмосферных осадков, а разгрузка вод происходит на склонах невысоких водоразделов, что является причиной формирования наледей в зимнее время. Большие площади таликов встречаются на водоразделах и их склонах, а также в заболоченных депрессиях рельефа. Однако надо отметить, что не все за-

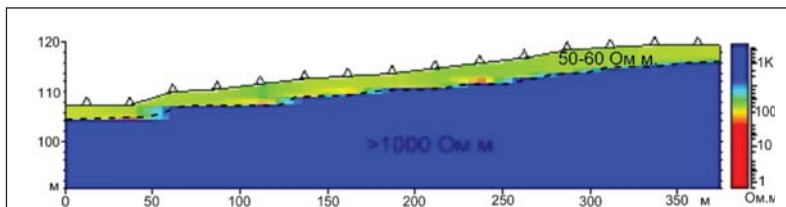


Рис. 2. Геоэлектрический разрез-инверсия для многолетнемерзлых пород со слоем сезонного оттаивания

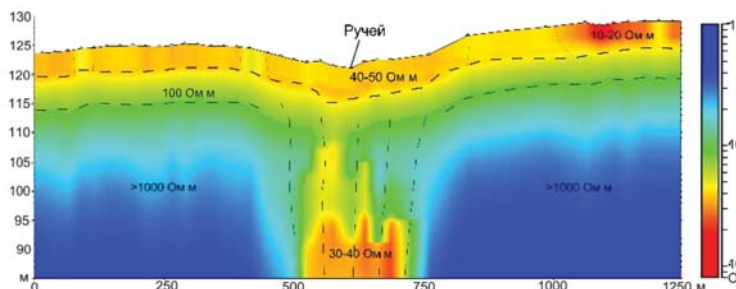


Рис. 3. Электромагнитный отклик геологической среды по данным электрического зондирования МПП со сквозным таликом в многолетнемерзлых породах

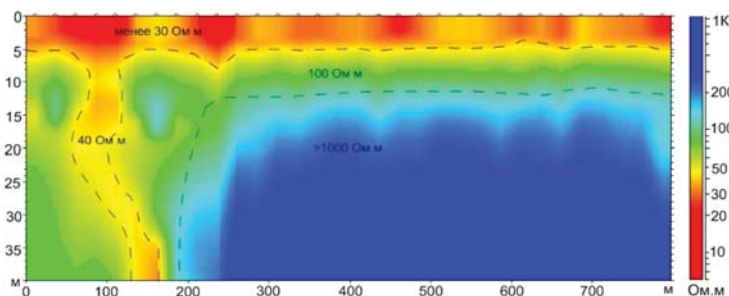


Рис. 4. Электромагнитный отклик геологической среды по данным электрического зондирования МПП со сквозным таликом в многолетнемерзлых породах

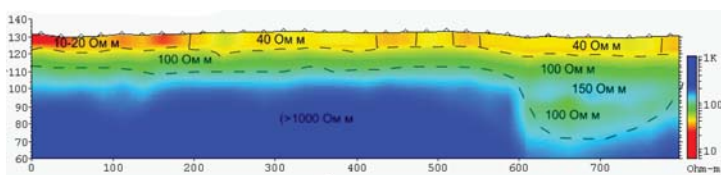
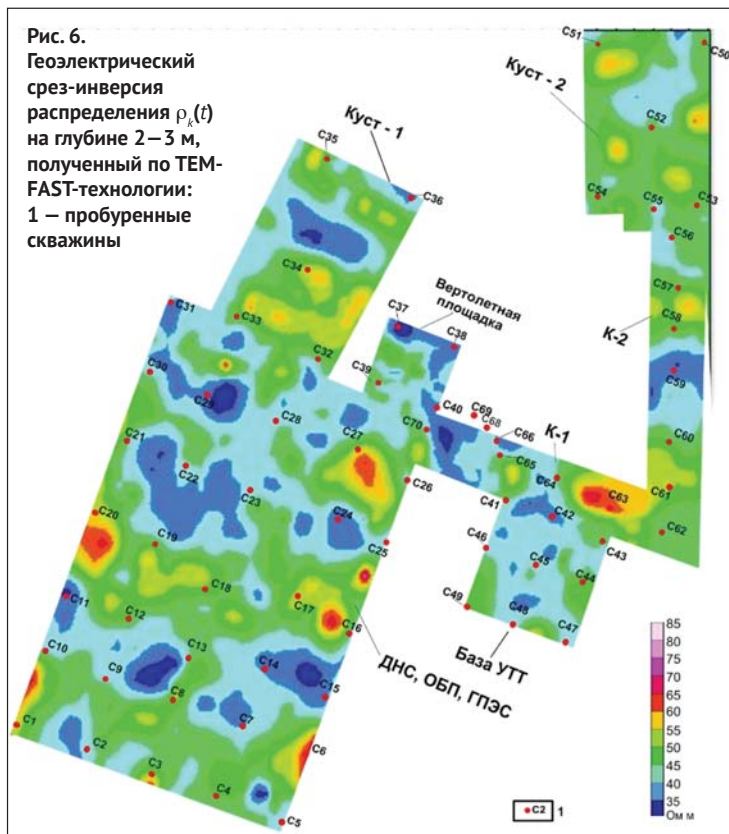


Рис. 5. Электромагнитный отклик геологической среды по данным электрического зондирования МПП с элементами сезонного оттаивания относительно небольших размеров в виде вреза

болоченные и заросшие кустарником места в понижениях поверхности между возвышенностями могут быть «индикаторами» опасных таликовых зон, так как по большей части это всего лишь результат переменного-сезонного таяния. Наиболее информативными и интересными в изучении грунтов по отношению их к мерзлотному состоянию являются результаты, которые позволяют наблюдать местонахождение незамерзающих талых зон на разных глубинных интервалах с распределением их в пределах планируемой площади под застройку. Такого рода информацию можно получить по результатам площадных электроразведочных работ МПП с построением срезов распределения кажущегося сопротивления по глубинам (рис. 6 и 7).

Геоэлектрический срез распределения кажущегося сопротивления  $rk(t)$  (рис. 6) выполнен для небольшой глубины (до 3 м) и представляет первый геоэлектрический слой R1 (интервала Z1-2). Этот срез дает



общее представление о литологическом составе пород, характеризуя при этом степень увлажненности и неравномерность их оттаивания в пределах первого слоя. Такого рода информация в первую очередь позволяет оценить состояние деятельного слоя грунта мощностью 0,3–3,0 м, где можно наглядно видеть все слабые места на планируемых под застройку площадках.

Далее, если заглянуть несколько глубже, можно установить, какие из этих слабых мест связаны с наиболее опасными зонами (секущими таликами). На рис. 7 приведен пример геоэлектрического среза по данным МПП (TEM-FAST-технология), выполненный для интервала глубин 45–50 м. В данном случае общий фон сопротивления пород высок, поэтому шкала, учитывая ее логарифмический масштаб, сместилась по цветовой гамме и несколько отличается от шкалы, представленной на рис. 6. Сопоставляя геоэлектрические срезы-инверсии, представленные на рис. 6 и 7, можно отчетливо увидеть наиболее безопасные места для строительных работ и уже на стадии их проектирования осуществлять необходимые меры и принимать правильные конструкторские решения.

На рис. 7 пунктирной линией отмечены талики, которые вообще не замерзают, даже в сильные морозы. Таких мест на всей рассматриваемой площади можно выделить по крайней мере восемь, и большая их часть сосредоточена на участке «ДНС ОБП ГПЭС» и в начале участка, планируемого под «коммуникационный коридор» (К-1) (рис. 7). Два из таких участков заслуживают наибольшего внимания — это участки 1 и 2 (геоэлектрические вертикальные разрезы для них представлены на рис. 3

и 4 соответственно). Самый большой и наиболее активный талик расположен в начале участка К1, ближе к контакту с участком «ДНС ОБП ГПЭС» (на рис. 7 отмечен номером 1).

Приведенный пример измерения на всех участках показал, что для большей части рассматриваемой территории характерен первый тип кривых (сет 331 рис. 1). Такие кривые отображают присутствие мерзлых пород в разрезе, и по ним может быть изучена в первую очередь глубина сезонного оттаивания (см. рис. 2), а также мощности мерзлых грунтов. На рассматриваемой территории сезонное оттаивание наблюдается повсеместно и в среднем составляет от 2–3 до 5 м, иногда и больше. Сопротивление пород этой части разреза невелико — примерно 50–60 Ом·м с незначительным горизонтальным градиентом по плоскости в зависимости от состава пород и степени оттаивания в различных местах (рис. 6). Полученные таким образом результаты геофизических

исследований позволили оценить общую обстановку состояния приповерхностных толщ пород с развитием и распространением криолитозоны (многолетнемерзлые породы) данной территории и достаточно точно наметить местонахождение таликовых зон, что очень важно перед техногенным ее использованием.

Разработанная методология и методика исследования криолитозоны на основе применения метода импульсной индуктивной электроразведки МПП позволяет с более реалистических позиций подойти к оценке возможностей данных технологий, а в ряде случаев и значительно повысить их эффективность. Эффективность геофизических исследований при изучении таких сложных объектов достигается применением методов различной физической природы с повышенной детальностью наблюдений, получением интегральных характеристик, отражающих особенности строения и свойств массива пород в его естественном залегании, возможностью многократных повторных наблюдений без нарушения строения и состояния геологической среды. Последнее обстоятельство позволяет осуществлять режимные геофизические наблюдения за интенсивностью геологических процессов, происходящих под воздействием естественных и техногенных факторов. Эти исследования имеют большое практическое значение и могут быть эффективно использованы для изучения состояния приповерхностных грунтов, при проектировании и в ходе эксплуатации готовых сооружений и способствовать предотвращению техногенных катастроф.

Таким образом, геофизические исследования с использованием МПП могут успешно исполь-

зоваться в средне- и крупномасштабных инженерно-геологических съемках, а также при детальном проектировании, строительстве и эксплуатации различных сооружений. Работы МПП можно успешно применять в инженерно-геологических съемках территорий с распространением многолетнемерзлых пород для решения трех групп задач:

- картирования мерзлых и талых отложений (выявления литологических контактов, тектонических нарушений, зон трещиноватости, участков сквозных и несквозных таликов, подземных льдов, обводненных зон);
- расчленения мерзлых и талых горных пород по глубине (определения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород, изучения распространения на глубине мерзлых пород, сквозных и несквозных таликов, т. е. выяснения строения многолетнемерзлых пород в плане и по глубине, поиска и разведки межмерзлотных и подмерзлотных подземных вод);
- изучения мерзлотных процессов и явлений, в том числе динамики сезонного промерзания и оттаивания, процессов палеообразования, пучения, термокарста, морозобойного растрескивания и др.

Инженерные геофизические изыскания следуют в обязательном порядке проводить на стадии предварительных изысканий под строительство, в ходе технического проектирования и эксплуатации сооружений. Они позволяют повышать детальность и точность изысканий, уменьшать затраты времени и средств на проведение инженерно-геологических работ.

Проведенные в рамках реализации проектов, связанных со строительством промышленных предприятий, инфраструктурных и социальных объектов на территории Ненецкого и Ямало-Ненецкого автономных округов, Архангельской области, Республики Коми, Республики Саха (Якутия) и других субъектов Федерации экспертные оценки экономической эффективности использования метода импульсной индуктивной электроразведки показали кратное (до трех-пяти раз) снижение прямых затрат на инженерные изыскания. Особенно велики различия в затратах на инженерные изыскания рассмотренным методом по сравнению с традиционными на неосвоенных территориях, в местах высокой концентрации перспективной хозяйственной деятельности, связанной с вовлечением в хозяйственный оборот новых источников сырья.

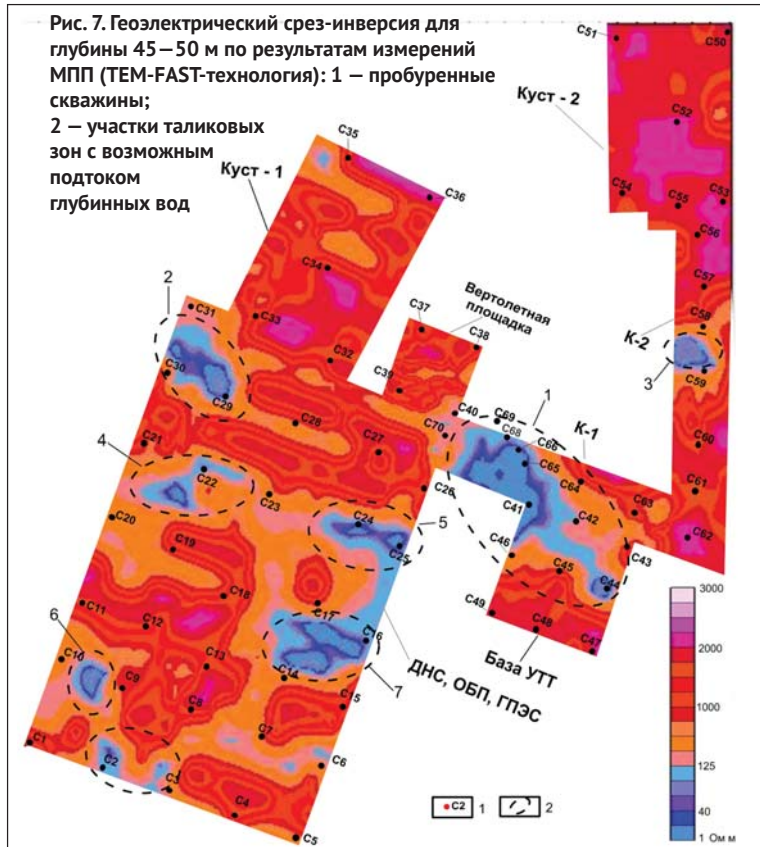


Рис. 7. Геоэлектрический срез-инверсия для глубины 45–50 м по результатам измерений МПП (ТЕМ-FAST-технология): 1 – пробуренные скважины; 2 – участки таликовых зон с возможным подтоком глубинных вод

## Литература

1. Дмитриев Ю. Ю. Современные методы электроразведки при исследовании криолитозоны в инженерных изысканиях // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 12.
2. Додин Д. А., Каминский В. Д., Павленко В. И., Супруненко О. И. Узловые проблемы обеспечения экономического развития Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 4. — С. 64—79.
3. Кожевников Н. О., Антонов Е. Ю. Инверсия данных МПП с учетом быстро протекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризуемого полупространства // Геофизика. — 2007. — № 1. — С. 42—51.
4. Кожевников Н. О., Никифоров С. П., Снопков С. В. Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах // Геоэкология. — 1995. — № 2. — С. 118—126.
5. Кожевников Н. О., Плотников А. Е. Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза // Геофизика. — 2004. — № 6. — С. 33—39.
6. Коротков Ю. В. К вопросу о выделении и отслеживании разрывных нарушений и кимберлитовых трубок по характерным изменениям проводимости в толщах осадочных отложений // Геофиз. изыскания. — 2011. — Т. 12, № 4. — С. 79—90.
7. Митюхин С. И. О геологической природе знакопеременных переходных процессов в Западной Якутии // Геология и геофизика. — 1985. — № 1. — С. 103—106.
8. Стогний В. В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. — Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. — 124 с.
9. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. — М.: Высш. шк., 1973.