

## ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА СУШЕ И ШЕЛЬФЕ

Изучение мерзлых пород в поле традиционно проводится путем исследования их проявлений в рельефе и в обнажениях, а также путем бурения скважин с описанием кернов и проведением термометрии. Еще одним мощным методом, позволяющим получать информацию о строении мерзлых пород на значительную глубину в условиях их любой обнаженности, в том числе и на шельфе, и не требующим затратного во временном и финансовом отношении бурения, является геофизика. Аппаратура и программные комплексы обработки геофизической разведки постоянно совершенствуются. Поэтому не подлежит сомнению, что со временем геофизические методы будут отвоевывать все большее место в изучении и мониторинге мерзлых пород. Переход грунтов в мерзлое состояние меняет ряд их петрофизических свойств, что, с одной стороны, позволяет диагностировать с помощью геофизики границы талых и мерзлых грунтов, а с другой,

предопределяет специфику применения традиционных геофизических методов на мерзлоте. В данной статье на примере проводившихся в последние годы работ в Арктике и Антарктиде специалистами ООО «МГУ-Геофизика», Российской антарктической экспедиции (РАЭ) и Российской научной экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ААНИИ рассмотрены основные геофизические методы с прицелом оценки эффективности их применения и информативности получаемых данных для решения различных задач геокриологии. Требованием практики в ходе активизировавшегося в последние годы освоения лицензионных участков на арктическом шельфе Российской Федерации стало изучение инженерно-геологических особенностей субмаринных мерзлых толщ. Поэтому в статье, в частности, рассмотрены варианты применения геофизической аппаратуры в морском исполнении для решения геокриологических задач на шельфе.

## Электроразведка

Принято считать, что высокий контраст удельных электрических сопротивлений талых и мерзлых пород обеспечивает наибольшую информативность электроразведки среди методов геофизики для изучения мерзлых пород. При решении геокриологических задач на суше неплохо зарекомендовали себя методы постоянного тока (ВЭЗ, ЭП, электротомография), позволяющие изучить верхнюю часть разреза с высокой степенью детальности. Физическая сущность методов постоянного тока заключается в пропускании постоянного электрического тока сквозь среду и оценке удельного электрического сопротивления (УЭС) этой среды. Анализ УЭС позволяет нам говорить о вещественном составе изучаемого разреза. Глубинность исследований увеличивается с помощью увеличения разноса питающих электродов.

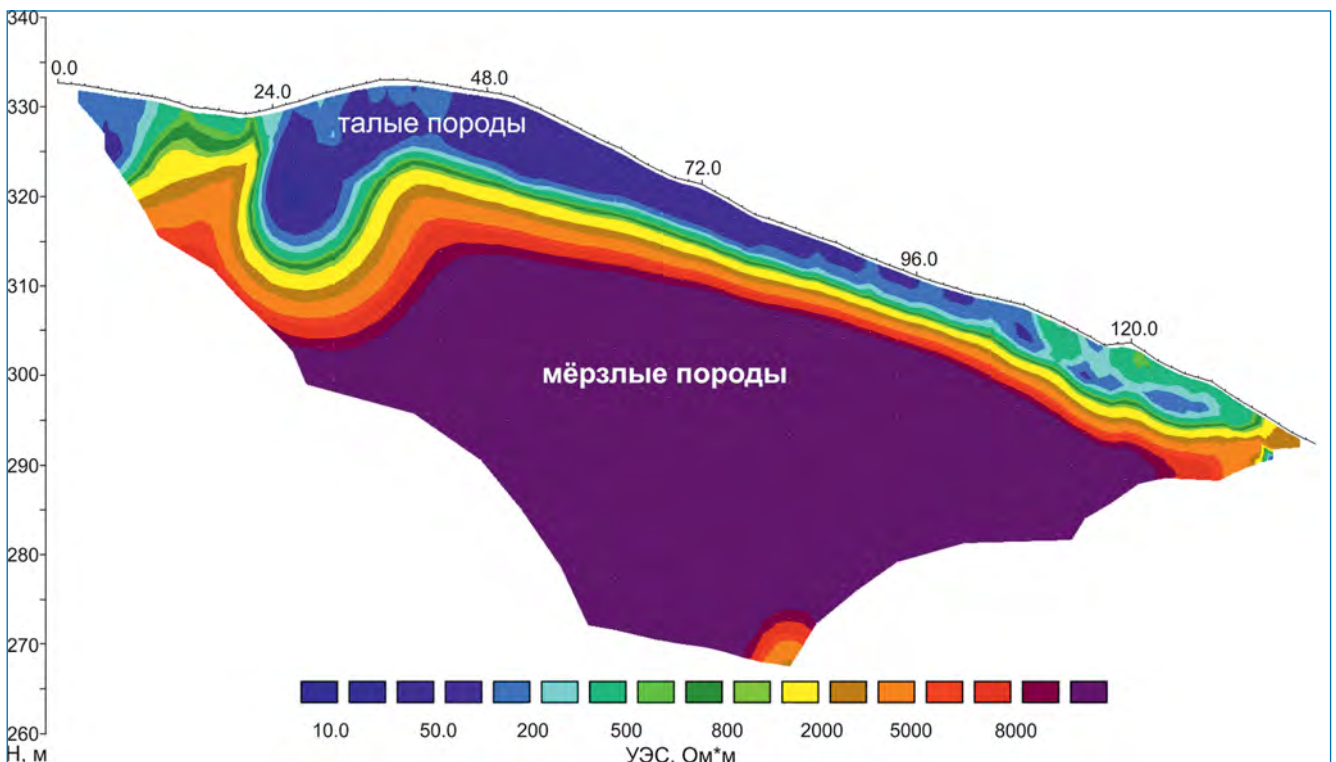
Среди методов электроразведки на постоянном токе благодаря совершенствованию алгоритмов интерпретации все чаще начинает применяться электротомография. Электротомография — это целый комплекс, включающий в себя как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же фиксированных на профиле наблюдений электродов. При помощи электротомографии исследуют сложно построенные среды с учетом рельефа поверхности земли и проводят детальную количественную интерпретацию в рамках двумерных и трехмерных моделей с высокой разрешающей способностью. Такой подход позволяет, с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а с другой стороны, применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии. Особенностью метода при изучении многолетнемерзлых пород является то, что он с наиболее высокой детальностью выявляет как субвертикальные границы между талыми и мерзлыми породами, так

и зоны, приуроченные к таликам и криопэгам. Пример результата исследований методом электротомографии приведен на рис. 1. Данный геоэлектрический разрез получен в ходе инженерно-геологических изысканий на Северной железной дороге под Воркутой. Электротомография позволила выявить верхнюю границу мерзлых пород, а на 24–36-м метре профиля, на вершине холма, выделен несквозной талик с субвертикальными границами, приуроченный к заболоченному участку.

Недостатками электротомографии и других методов электроразведки на постоянном токе является необходимость обеспечения низких переходных сопротивлений при заземлении электродов на поверхности земли (что делает затруднительным или невозможным ее применение в зимних условиях и на скальных грунтах), использование больших разносов для увеличения глубинности исследований, невозможность исследований под электрическими изоляторами (льдами). Этих недостатков лишены методы электромагнитных зондирований, используемые для решения более глубоких задач, при работе в зимних условиях и на скальных грунтах. Физическая сущность методов электромагнитных зондирований заключается в возбуждении на поверхности среды электромагнитного поля разных частот. В зависимости от своей частоты электромагнитное поле проникает в глубь среды на разные глубины и затухает в соответствии с УЭС среды. Измеряя электромагнитное поле на поверхности среды на этих же частотах, мы можем получить распределение УЭС в зависимости от частоты (технология частотных зондирований — ЧЗ) или от периода (технология становления поля — ЗС) электромагнитного поля. Глубинность исследований увеличивается с помощью понижения частоты или увеличения периода возбуждаемого и измеряемого электромагнитного поля. Анализ УЭС позволяет нам говорить о вещественном составе изучаемого разреза.

Широко используется метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в модификации

Рис. 1. Геоэлектрический разрез холма на Северной железной дороге под Воркутой, полученный методом электротомографии



«петля в петле» или в однопетлевом режиме. Метод основан на возбуждении электромагнитного поля в среде путем включения-выключения тока в генераторной петле с последующим наблюдением за сигналом «становления поля» в приемной петле. Форма импульса тока в генераторной линии и измеряемый сигнал в приемной линии приведены на рис. 2.

К преимуществам метода ЗСБ традиционно относятся быстрота выполнения полевых работ, более высокая глубинность и локализованность исследований по сравнению с методами, основанными на постоянном токе. Отдельно следует отметить отсутствие необходимости заземления электродов, что в случае работы в зимний период является решающим фактором при выборе полевых методов исследования. В качестве примера рассмотрим геоэлектрические разрезы в долине Грёндален на Шпицбергене, полученные весной 2019 года в ходе работ РАЭ-Ш (рис. 3). Работы выполнялись петлей 25×25 и 50×50 м, сила тока в генераторной линии составляла 1–4 А. При заданных параметрах максимальная глубинность исследований составляет 50–100 м. На разрезах отчетливо выделяется таликовая зона мощностью до 50 м, перекрытая сверху мерзлыми породами мощностью до 10 м и подстилаемая скальным основанием.

Однако метод ЗСБ не лишен и ряда недостатков — повышенная чувствительность к электромагнитному зашумлению, более сложная методика обработки полевых материалов (особенно в случае построения 3D-моделей) и явления поляризуемости верхней льдистой части разреза. Остановимся на последнем пункте подробнее. Сигнал становления поля связан с возникновением в среде вторичных токов индукции. Очевидно, что для наблюдения продолжительного сигнала становления поля необходимым фактором является наличие в изучаемом разрезе проводников. Сравним кривые кажущегося сопротивления, полученные в пикете ПР-6, расположенном у побережья залива Грён-фьорд и на удалении 9 км от моря в точке Кили-2 (рис. 3, рис. 4, кривые а и б соответственно).

Как видно из рис. 4, кривая кажущегося сопротивления в пикете ПР-6 (рис. 4 а) является гладкой до времен 2–3 мс, соответственно, по этой кривой можно выполнить моделирование и получить разрез удельных электрических сопротивлений, то есть выделить в разрезе слои грунтов различного сопротивления. Кривая кажущегося сопротивления в пикете Кили-2 (рис. 4 б) «разбивается» начиная с времен 0,01 мс, что связано с быстрым спадом электромагнитного поля и колебаниями значений ЭДС около нуля, то есть данные,

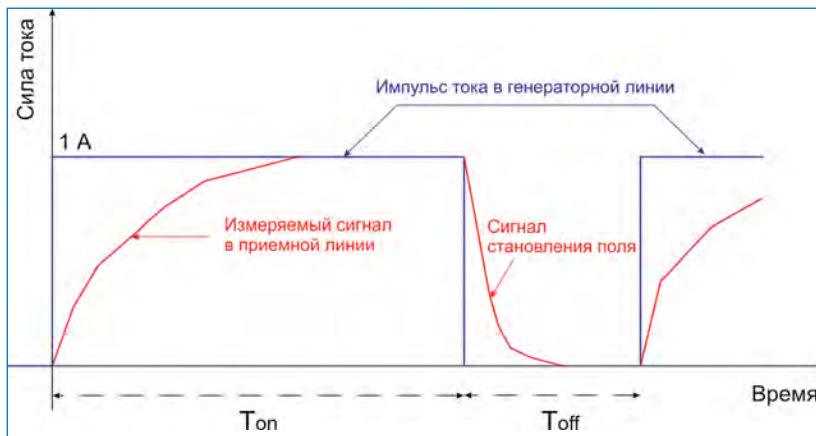


Рис. 2. Импульс тока и измеряемый сигнал при работе методом ЗСБ

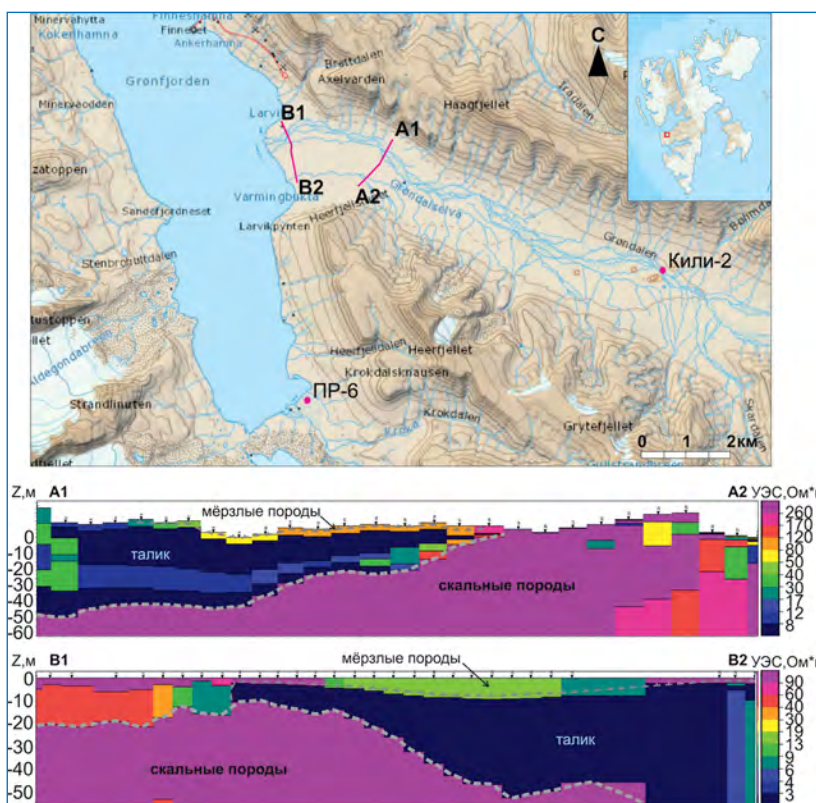


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы, полученные методом ЗСБ в окрестностях пос. Баренцбург на острове Западный Шпицберген

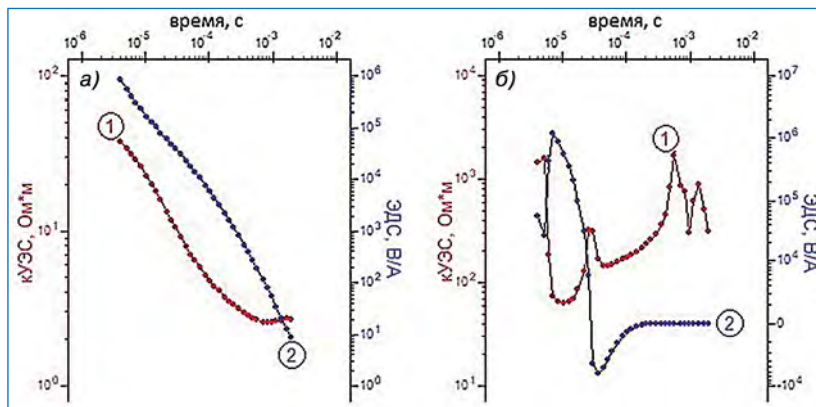


Рис. 4. Пример информативных и неинформативных (эффект поляризуемости) кривых кажущегося сопротивления по методу ЗСБ, полученных в пикетах на разном удалении от залива Грён-фьорд на острове Западный Шпицберген (а – пикет ПР-6, б – пикет Кили-2, см. рис. 3): 1 – кривая кажущегося сопротивления, 2 – кривая спада электромагнитного поля



Рис. 5. Морские геофизические работы методом ЧЗ на Приамальском шельфе



Рис. 6. Морские геофизические работы методом ЗСБ на Приамальском шельфе

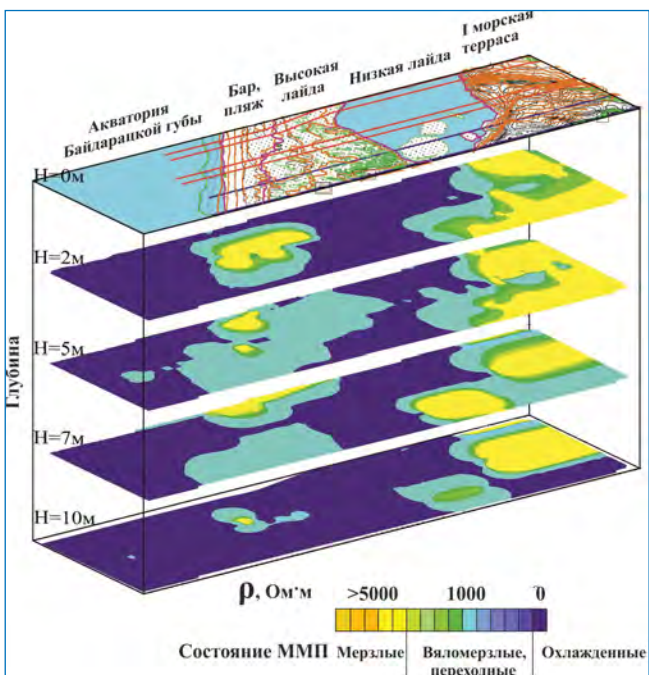


Рис. 7. Модель состояния многолетнемерзлых пород участка Приамальского шельфа по данным ЧЗ, буровых работ, термометрии и лабораторных испытаний

полученные в последующих измерениях, являются некондиционными. Резкий спад ЭДС на кривой в пикете Кили-2 связан с отсутствием в разрезе проводников, что позволяет сделать лишь качественную оценку геологической среды — до глубины исследования 50–100 м в разрезе присутствуют исключительно высокоомные мерзлые либо скальные породы.

Особенно ярко достоинства методов электромагнитных зондирований проявляются при изучении субмаринных многолетнемерзлых толщ. Это связано с высокой проводимостью водной толщи и талых пород, высокими УЭС субмаринных многолетнемерзлых пород и возможностью исследовать изучаемый разрез на глубинах 500–1000 м от дна компактными установками с длинами диполей до 300 м. Для выполнения электромагнитных исследований в транзитной зоне суша — шельф Карского моря была использована технология малоглубинных частотных зондирований (патент ООО «МГУ-Геофизика» № 2280269). С помощью технологии ЧЗ инновационные морские геофизические работы с целью картирования субмаринных мерзлых толщ выполнялись на шельфах Карского моря в районе Байдаранкой губы и Харасавэйского мелководья (рис. 5), на шельфе Чукотского моря в районе Чаунской губы в 2006–2015 годах. Общий объем работ составил более 1000 частотных зондирований.

Для изучения субмаринных многолетнемерзлых толщ на акватории с глубинами более 5 м в Карском море выполнялись более глубокие электромагнитные зондирования методом ЗСБ (рис. 6).

Наиболее полно к настоящему времени с использованием геофизических методов исследованы мерзлые породы на шельфе Карского моря. Интерпретация данных ЧЗ и ЗСБ заключалась в 1D-инверсии кривых кажущегося сопротивления в геоэлектрические разрезы с помощью математического моделирования данных в программе «Faraday». По результатам инверсии полевых данных ЧЗ были зафиксированы многочисленные высокоомные «козырьки», простирающиеся от берега в сторону акватории на 100–200 м и имеющие мощность до 10 м. По результатам полевых данных ЗСБ высокоомные зоны на шельфе Карского моря зафиксированы до глубин 300–400 м от поверхности дна. Бурение, термометрия и лабораторные испытания образцов пород, выполненные в транзитной зоне суша — шельф Карского моря, позволили построить модель состояния многолетнемерзлых пород для участка приамальского шельфа (рис. 7).

В результате наших исследований установлено:

1. На шельфе Карского моря существует горизонт высокого сопротивления (высокоомный слой), проверенный буровыми работами и термометрическими наблюдениями, кровля которого связана на шельфе Карского моря (приамальский участок, глубины моря 1–100 м) с многолетнемерзлыми породами.

2. Установлено, что для шельфа Карского моря характерно прерывистое распространение многолетнемерзлых пород с зонами сквозной деградации многолетнемерзлых пород, достигающих горизонтальных размеров от 10 до 50 км. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря располагается в пределах 1–150 м, подошва — в пределах 300–400 м. Многолетнемерзлые породы в транзитной зоне суша — шельф имеют двухслойное строение. Мощность современных «козырьков» многолетнемерзлых пород составляет не более 10 м и простирается до 100–200 м.

## Георадиолокация

Метод георадиолокации применяется для детального исследования верхней части разреза до глубины около 10 м в районах развития многолетнемерзлых пород. Принцип действия аппаратуры подповерхностного радиолокационного зондирования (в общепринятой терминологии — георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства (разную диэлектрическую проницаемость). Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между тальмы и мерзлыми грунтами, уровень грунтовых вод, контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между коренными и осадочными породами и т.д. В зимних условиях георадарные исследования в силу относительной простоты выполнения дают возможность работать на труднопроходимых участках бригадой из 1–2 человек. Результатом георадарных исследований является геолого-геофизический разрез, позволяющий выделить с высокой детальностью контрастные границы

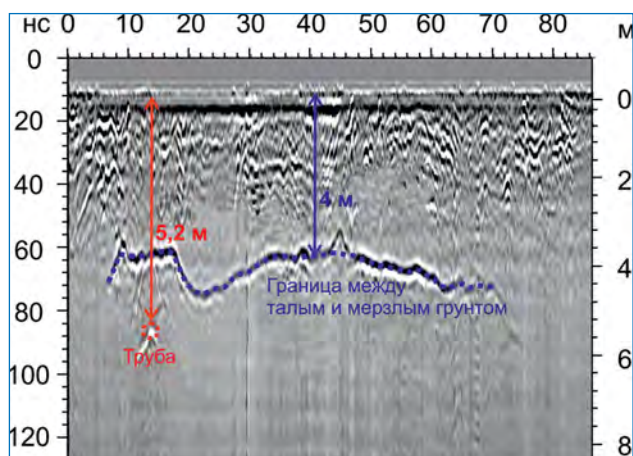


Рис. 8. Георадиолокационный разрез с локализацией кровли мерзлых пород и трубы газопровода

(рис. 8). На приведенном примере выделена граница между тальмы и мерзлыми грунтами, сформированная установленными термостабилизаторами на участке прокладки газопровода на Европейском Севере. Недостатком метода является низкая глубинность, особенно при работе на засоленных и глинистых разрезах.

## Сейсморазведка

Возможность использования сейсмических методов при изучении строения многолетнемерзлых пород заключается в том, что важные в инженерно-геологическом отношении границы совпадают с сейсмическими. Кровля мерзлых пород и скальных пород, уровень грунтовых вод представляют собой сильные преломляющие границы. При переходе состояния грунта от талого к мерзлому структура грунта становится более монолитной и жесткой, что и дает увеличение скоростей сейсмических волн. Область применения сейсморазведки при мерзлотных работах ограничивается в основном картированием кровли мерзлоты и изучением распространения и мощности несквозных и сквозных таликов. Определение мощности мерзлых пород для сейсморазведки является сложной задачей, так как подошва мерз-

лых толщ зачастую является «размытой» в сейсмическом отношении и даже контрастная граница может быть выявлена только с помощью отраженных волн, регистрация которых возможна только для случая залегания нижней границы мерзлоты на глубинах, превышающих 200 м. Из минусов применения сейсморазведочных исследований необходимо отметить также высокую трудозатратность относительно, например, методов электроразведки. В районах с большим снежным покровом для выполнения работ необходимо расчищать сейсмические профили для прокладки сейсмокося и установки сейсмодатчиков.

## Гравиразведка

В настоящее время при проведении исследований в областях развития многолетнемерзлых пород аномалии гравитационного поля используются как для решения локальных инженерных и геологических задач, так и для изучения региональных и глобальных процессов в криолитосфере (см. дистанционные методы). Основным фактором, определяющим эффективность использования гравиметрии, является различие по плотности породообразующих комплексов. По сравнению с упругими и электрическими свойствами контраст (дефицит) плотности мерзлых и вмещающих пород относительно

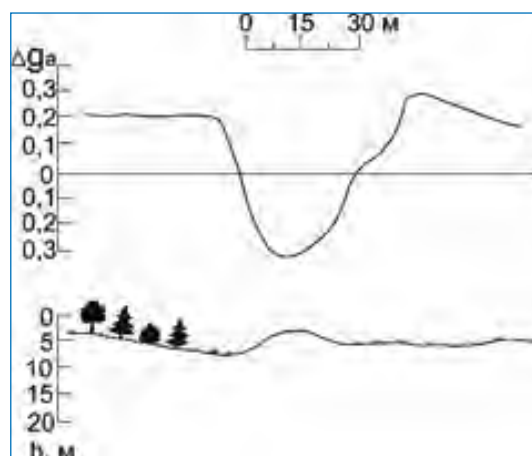


Рис. 9. Отрицательная гравитационная аномалия над бугром пучения

небольшой ( $0,1 \text{ г/см}^3$  и менее). Исключением можно считать массивы грунтового льда с отрицательной эффективной плотностью до  $-0,68 \text{ г/см}^3$  (плотность льда  $0,92 \text{ г/см}^3$ , вмещающего грунта  $1,6 \text{ г/см}^3$ ), но их распространение и эффективная аномалообразующая масса, как правило, незначительны. Эти условия ожидаемо приводят к формированию аномалий небольшой амплитуды ( $0\text{--}40 \text{ мкГал}$ ). Тем не менее современная аппаратура и методика гравиметрических наблюдений позволяют изучать (в комплексе, например, с электроразведкой) распространение многолетнемерзлых пород в разрезе и по площади (рис. 9).

## Магниторазведка

Магнитные свойства горных пород практически не изменяются при переходе в мерзлое состояние, но присутствие в породе крупных льдопроявлений может служить причиной отрицательных аномалий магнитного поля. Существуют геомагнитные модели и расчетные аномалии для случая жильных льдов и пластовых льдов. В благоприятных случаях магниторазведку можно использовать с целью картирования погребенных льдов, в том числе для определения глубины их зале-

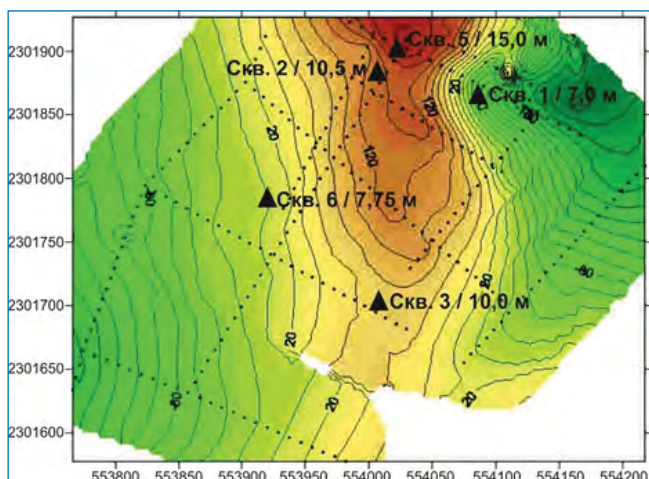


Рис. 10. Карта аномалий величины магнитного поля ( $\Delta T$ , нТл) на перешейке озер Рейд и Нелла в оазисе Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) с указанием мест расположения пробуренных скважин и мощности вскрытых ими отложений

гания и мощности. Так как отрицательные аномалии магнитного поля над погребенными льдами невелики в абсолютном исчислении, применяется высокоточная микромагнитная съемка с малым шагом и обязательной записью и учетом вариации естественного магнитного поля Земли.

На практике встречаются случаи, когда мерзлота может отличаться и повышенными значениями магнитной напряженности, что также может использоваться для ее картирования. Так, в сезон 58-й РАЭ на перешейке озер Рейд и Нелла в оазисе Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) перед отрядом мерзлотоведов стояла задача пробурить опорную термометрическую скважину глубиной около 15 м. С помощью малогабаритной буровой установки были пробурены скважины до скального основания глубиной от 7,0 до 10,5 м (рис. 10), более мощных толщ четвертичных мерзлых пород обнаружено не было. Но скважины глубиной 11 м не позволяют выйти за пределы слоя годовых колебаний температуры и проводить мониторинг температуры на глубине так называемых нулевых амплитуд, что является требованием международных программ мониторинга мерзлых пород. Свою помощь буровикам предложил сотрудник станции Прогресс А.К. Симонов, проводивший стационарные наблюдения магнитного поля в процессе зимовки. Имея значительный опыт геофизических геологоразведочных работ на золото, А.К. Симонов предположил, что задача выделения точки с максимальной мощностью четвертичных отложений может быть решена с помощью имеющегося в распоряжении стационарного магнитолога прибора «Минимаг». Он исходил из того, что в процессе денудации коренных пород — кварц-фельдшпатитовых парагнейсов с содержанием силлиманита, шпинелей и магнетита верхнепротерозойского возраста — тяжелая фракция будет накапливаться в пониженных участках. Это предположение перед постановкой магнитной съемки было проверено путем шлихования имеющихся образцов из скважин (а после возвращения из экспедиции и капаметрией на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова). В течение двух дней с помощью магнитометра «Минимаг», карманного GPS, обеспечивающего точность привязки в плане не менее 2 м, и высотомерной рейки были составлены карты аномалий величины (амплитуды) магнитного поля. Учет естественных вариаций магнитного поля был сделан

с использованием данных пункта мониторинга магнитного поля станции Прогресс. В результате обнаружили положительную аномалию, в пределах которой пробурили скважину 5 (рис. 10), вскрывшую наибольшую известную в оазисе Холмы Ларсеманн мощность мерзлых четвертичных отложений — 15 м. Скважина была оборудована термокосой, поставленная задача была успешно выполнена. Следует отметить, что участок с данным «карманом» повышенной мощности четвертичных отложений совершенно не читался геоморфологически и мог быть обнаружен только с помощью геофизики.

### Дистанционные методы

Спутниковые данные уже более 10 лет с успехом применяются при решении задач, связанных с изучением мерзлых пород Марса. Нейтронные и гамма-спектрометры позволили провести картирование распространения льдосодержащих пород с пространственным разрешением порядка  $1^\circ$  и даже выявить особенности вертикального распределения льда в приповерхностном реголите. С помощью георадиолокации на Марсе выделены зоны, интерпретируемые как глубоко залегающие (километры) льдосодержащие породы и подледниковые озера с засоленной водой. В случае Земли применение методов спутниковой ядерной планетологии оказывается невозможным из-за наличия магнитного поля и плотной атмосферы. Пары воды в земной атмосфере вместе с фактом присутствия значительного количества незамерзшей воды делают невозможным применение георадиолокации в спутниковом исполнении. Существуют попытки истолкования данных гравиметрических измерений низкоорбитальных спутников GRACE в величинах темпов деградации мерзлых толщ. Увеличение эквивалента содержания грунтовой влаги 3–4 см/год, регистрируемое в данных гравитационной съемки на севере Сибири, Канады и на Аляске, авторы эксперимента GRACE связывают с таянием мерзлоты вследствие потепления климата. Другие спутниковые данные, известные на настоящий момент, позволяют получить лишь косвенную информацию о мерзлых породах. По инициативе Европейского космического агентства ESA реализовывался проект PERMAFROST, призванный систематизировать спутниковые данные для целей мерзлотных исследований. В проекте анализировался мониторинг следующих спутниковых данных: температура поверхности (MODIS, AATSR, AMSR-E), снежный покров (GlobeSnow), растительный покров (GlobCover, GlobCarbon), влажность почвы (WACMOS, ASCAT), рельеф поверхности (SRTM). Из аэрометодов, которые можно применять для решения мерзлотных задач, как правило с использованием в качестве носителя вертолета, следует отметить электроразведку методом переходных процессов и зондированием в частотной области, позволяющую изучать распределение кажущихся сопротивлений в интервале глубин до 300 м с высоким разрешением в плане и по глубине. Развитие беспилотных летательных аппаратов делает возможным применение аэрометодов для выполнения магнитной съемки высокого разрешения для картирования мощности мерзлых пород над скальным основанием и для выделения подземных льдов.

### Заключение

Накоплен значительный опыт применения геофизических методов в различных модификациях для решения широкого спектра геокрилогических задач, как в ходе научно-исследовательских, так и в ходе инженерно-геологических работ. Каждый из методов имеет

Таблица

## Наиболее информативные методы решения различных задач геокриологии

Решаемая геокриологическая задача	Наиболее информативные методы	Ограничения	Количество операторов и вспомогательного персонала
Картирование погребенных льдов	ВЭЗ, электротомография	Возможность определения только верхней границы льда	3 чел.
	ЗСБ	Эффект поляризации в случае отсутствия проводников в разрезе	2 чел.
	ЧЗ	–	2 чел.
	Микрогравиразведка	Необходимость детальных геодезических работ	1 чел.
	Микромагниторазведка	Сложность количественной параметризации залежи льда	1 чел.
	Георадиолокация	Работает только в случае близповерхностного (первые метры) залегания льда	1 чел.
Картирование таликов и криопэгов	Электротомография	–	3 чел.
	ЗСБ	–	2 чел.
	ЧЗ	–	2 чел.
Картирование нижней границы мерзлоты	ЗСБ, ВЭЗ	–	2–3 чел.
Поиск районов с максимальной мощностью четвертичных мерзлых пород над скальными породами	Сейсморазведка	–	3 чел.
	Микромагниторазведка	Работает только в случае контрастности магнитных свойств мерзлых и скальных пород	1 чел.
	Микрогравиразведка	Необходимость детальных геодезических работ	1 чел.
Картирование субмаринных мерзлых толщ на шельфе	ЧЗ	Изучается только верхняя часть разреза	2 чел.
	ЗСБ	–	2 чел.

свои преимущества и ограничения. Выбор применения того или другого метода для решения конкретной задачи — нетривиальная для геолога задача, которая должна решаться вместе с геофизиками с учетом анализа априорной геологической и мерзлотной информации, необходимой детальности исследований, стоимости работ и т.д. В таблице приведены типичные геокриологические задачи и наиболее информативные геофизические методы их решения. Необходимо учитывать, что надежная интерпретация геофизических данных требует наличия

данных опорного бурения или хотя бы проведения исследований комплексом из нескольких геофизических методов; работы на мерзлоте не являются исключением из этого правила.

*А.В. Кошурников<sup>1</sup>, Н.Э. Демидов<sup>2</sup>, А.Ю. Гунар<sup>1</sup>,  
Н.В. Желтенкова<sup>1</sup>, К.В. Кривошея<sup>1</sup>,  
А.А. Погорелов<sup>1</sup>, Ю.Д. Зыков<sup>1</sup>  
(1 – ООО «МГУ-Геофизика», 2 – ААНИИ)*