

УДК 551.340

А.И. Тюрин¹, В.С. Исаев², Д.О. Сергеев³, В.Е. Тумской⁴, Н.Г. Волков⁵,
И.С. Соколов⁶, О.И. Комаров⁷, А.В. Кошурников⁸, А.Ю. Гунар⁹,
И.А. Комаров¹⁰, В.В. Ананьев¹¹

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ МЕТОДОВ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках полевой конференции День науки и инноваций на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова опробованы современные инновационные полевые методы инженерно-геокриологических исследований, проведены мастер-классы ведущих специалистов в инженерно-геокриологических изысканиях, осуществлено тестирование измерительной аппаратуры для исследования температурных полей грунтового массива. Показана необходимость включения инновационных элементов в образовательный процесс.

Ключевые слова: полевые методы инженерно-геокриологических исследований, метод статического зондирования мерзлых грунтов, термокосы, сезонно-охлаждающие устройства, аэрофотосъемка, лазерное сканирование (LIDAR).

Testing of modern innovation field methods of engineering-geocryological research, master class workout by leading specialists of engineering-geocryological surveys, checking out of measurement equipment for thermal field ground massif researches which were done at "The day of science and innovation" field conference in Zvenigorod biological station of Lomonosov Moscow state university. Necessity of innovation methods usage has approved.

Key words: field method of engineering-cryological research, method of static probe research of frost grounds, thermal string, thermal syphon, aerial photography, laser scanning (LIDAR technology).

Актуальность. Территория Российской Федерации на сегодняшний день в геокриологическом аспекте за редким исключением представляет собой объект исследования инженеров-геокриологов в связи с распространением многолетнемерзлых и сезонномерзлых пород на большей части ее территории [Балобаев, 1973]. Изменения температурного режима мерзлых пород приводят к оттаиванию грунтов, сопровождающемуся потерей их прочностных свойств, что приводит к техногенным катастрофам [Основы..., 1999]. Сложность строения и нестабильность состояния мерзлого массива ставят перед инженерно-геологической отраслью следующие задачи:

- сбор достоверной, оперативной информации о грунтовом массиве, находящемся в зоне отрицательных значений температуры;
- прогноз состояния мерзлого массива, учитывающего климатический тренд для исследуемого региона и техногенную нагрузку при освоении конкретной территории;
- обоснование палеореконструкции климатических условий формирования мерзлых толщ на изучаемой территории, основывающейся на знании закономерностей формирования криосферы.

При подготовке специалистов для решения поставленных инженерно-геокриологических за-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* tjurin_alex@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* tpomed@rambler.ru

³ Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, зав. лаб., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* sergeevdo@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* vtumskoy@rambler.ru

⁵ ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», вед. инженер, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* ngv@fugro.ru

⁶ ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», инженер; *e-mail:* ssi@fugro.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, науч.с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* msu.geophiz@gmail.com

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* koshurnikov@msu-geophysics.ru

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* gunar@msu-geophysics.ru

¹⁰ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* ilya_komarov@mail.ru

¹¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского» (ПКУ), канд. техн. н.; *e-mail:* vvanord@yandex.ru

дач кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова проводит практику студентов 4-го курса инженерного потока по программе «Полевые методы геокриологических исследований» [Полевые..., 1986]. Практика проводится на территории Звенигородской биостанции МГУ, где за последние годы созданы площадки комплексного инженерно-геокриологического мониторинга, включающего:

- наблюдения за температурными характеристиками грунтовых массивов разных таксонометрических единиц, выделяемых студентами в ходе микрорайонирования;
- наблюдения за процессом морозного пучения в выделенных микрорайонах;
- инженерное бурение с отбором керна для изучения текстур мерзлого грунта;
- широкий спектр геофизических исследований: электротомография, высокочастотное зондирование (ЧЗ).

Освоение полевых методов инженерно-геокриологических исследований позволяет студентам получать полевые данные инженерно-геокриологических изысканий, составлять прогноз развития криогенных процессов, предлагать наиболее эффективные методы борьбы с криогенными явлениями, отталкиваясь от традиционной методики проведения полевых инженерно-геокриологических исследований.

В связи с меняющимися требованиями к инженерным изысканиям программа практики в 2015 г. была дополнена Днем науки и инноваций, который стал традиционным. В его рамках студентам предоставляется возможность ознакомиться и протестировать новые направления в инженерно-геологических исследованиях, такие, как:

- метод статического зондирования грунтов в приложении к мерзлым грунтам;
- термостабилизация грунта при помощи сезонных охлаждающих устройств (СОУ);
- аэрофотосъемка с применением беспилотных летающих аппаратов (БПЛА);
- 3-мерная топографическая съемка местности с помощью передовой технологии лазерного сканирования (ЛИДАР);
- исследование сезонно-мерзлых грунтов новейшими геофизическими методами и аппаратурой.

Кроме того, проводится тестирование измерительной аппаратуры разных производителей, показывающее их недостатки и преимущества. Это позволяет провести экспертную оценку изыскательского оборудования, что, безусловно, влияет на качество проводимых инженерных работ. В 2017 г. были протестированы температурные косы разных производителей.

Сравнение результатов измерения температуры среды температурными косами разных производителей.

Эксперимент проведен на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова в период с 12:30 23 января по 09:30 24 января 2017 г. В сравнении участвовали:

- 1) термокоса и логгер В.Х. Кирьякова (Россия, ИЗМИРАН);
- 2) термокоса и логгер В.А. Дубровина (Россия, ВСЕГИНГЕО–ИКИ);
- 3) термокоса и логгер компании «GEOPRECISION» (Германия) [<http://www.geoprecision.com/>];
- 4) Термокоса и логгер компании НОВО (США) [<http://www.onset-comp.com/products/data-loggers-sensors/temperature>]

Постановка эксперимента. Пять датчиков от каждой термокосы (за исключением косы НОВО, у которой всего 4 датчика) были смотаны поблочно. Размер блока в поперечнике 3–4 см, длина по датчикам около 4 см. Из-за разных размеров датчиков термокос (самые крупные датчики — у кос с № 1, 2) датчики располагали снаружи смотки, а более компактные у кос № 3, 4 помещали внутри смоток. Каждая смотка была зафиксирована изолентой разного цвета, а сверху обмотана 1–2 слоями термопеноизоляции (толщина обмотки около 2 мм) (рис. 1, слева). Все косы были положены в снежную яму на глубину около 30 см на одном уровне одна рядом с другой и засыпаны слегка утрамбованным снегом, а логгеры лежали в сумке рядом (рис. 1, справа).

Измерения температуры проводились через 15 мин, часы всех логгеров перед установкой были сверены и не должны отличаться более чем на 1–2 мин.

Температура воздуха во время эксперимента составляла около +1 °С, поэтому в толще снега было практически безградиентное температурное поле с температурой вблизи фазового перехода, это положительный момент при проведении эксперимента.

Обработка результатов. Полученные данные сняли со всех логгеров и в программе Grapher построили кривые изменения температуры во времени для каждого блока датчиков (в качестве названия файлов выбраны номера датчиков косы В. Кирьякова). На рис. 2 приведены два графика для каждой смотки: первый — за все время измерений, включая начальную выстойку (она составила 50–100 мин), второй — без выстойки в увеличенном масштабе по температуре, чтобы было видно, как работают датчики температуры кос разных производителей.

Обустройство термометрических скважин в пластиковых трубах в сочетании со статическим зондированием на площадке испытаний СОУ. На Звенигородском полигоне обустроена новая исследовательская площадка, где тестируются СОУ разного типа. Предполагается проводить новые испытания по работе СОУ круглогодичной эксплуатации. Для оценки эффективности работы СОУ компанией «Фугро» разрабатывается новая методика, которая использует технологию стати-



Рис. 1. Блок термодатчиков (слева) и площадка эксперимента (справа)

ческого зондирования. Технология статического зондирования заключается в следующем: в процессе внедрения зонда-конуса в грунт измеряется ряд параметров — лобовое сопротивление вдавлению, трение по боковой поверхности, температура, поровое давление и ряд других параметров в зависимости от выбранной компоновки. При ис-

пытаниях на Звенигородском полигоне измеряли лобовое сопротивление вдавлению, трение по боковой поверхности и температуру грунтов. На рис. 3 и 4 представлены результаты испытаний, которые фиксируют точку отсчета для мониторинга грунтовых условий на исследуемой площадке.

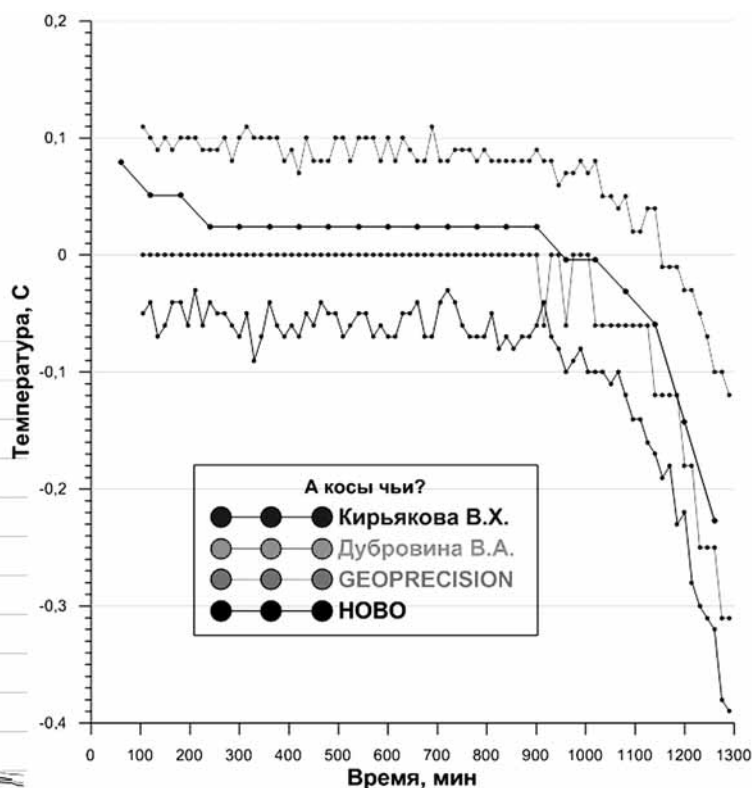
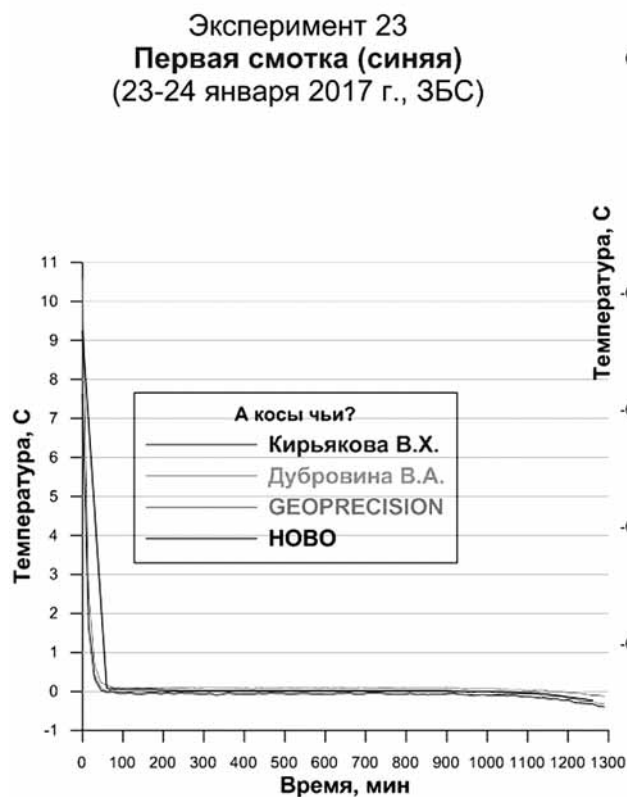


Рис. 2. Сравнение результатов измерения температуры среды температурными косами разных производителей (слева — полный цикл; справа — в интервале температуры $-0,4 \div 0,1$ °С)

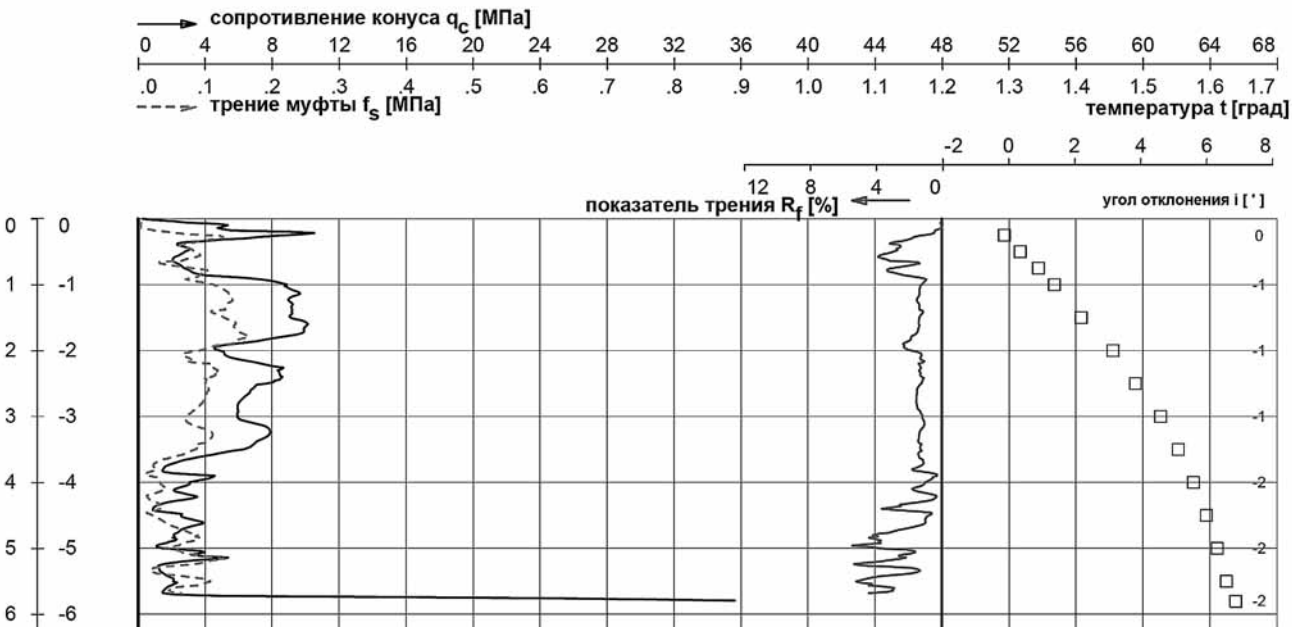


Рис. 3. Результаты статического зондирования грунтов на площадке с термостабилизаторами

Статическое зондирование на мерзлых грунтах — перспективный метод изучения прочностных и деформационных характеристик мерзлых грунтов. С его помощью можно достоверно устанавливать границы распространения мерзлых грунтов и картировать таликовые зоны и зоны распространения грунтов в пластичномерзлом состоянии. Статическое зондирование с помощью конуса с температурным датчиком позволяет получить температурный профиль с заданным шагом с высокой точностью измерения в течение одного дня. С помощью статического зондирования можно также исследовать состояние мерзлых грунтов, охлажденных термостабилизаторами. Главное преимущество этого метода возможность в процессе одного испытания измерить как увеличение механических характеристик мерзлых грунтов, так и понижение температуры мерзлых грунтов.

Таким образом составляется эмпирическая база данных, позволяющая оценить насколько необходимо понизить температуру мерзлых грунтов, чтобы достичь необходимых значений механических свойств мерзлых грунтов. Испытания предполагается проводить ежегодно, чтобы отследить динамику развития промораживания грунтов в процессе работы СОУ.

К преимуществам метода относится то, что данные о температуре можно получать путем прямого измерения на протяжении всего испытания на любой интересующей глубине. После проведения испытания отверстие, оставшееся после внедрения зонда, оборудуется обсадной трубой и оснащается «термокосой» для периодических измерений температуры грунты. Для обустройства термометрической скважины на основе статического зондирования используется сплошная пластиковая

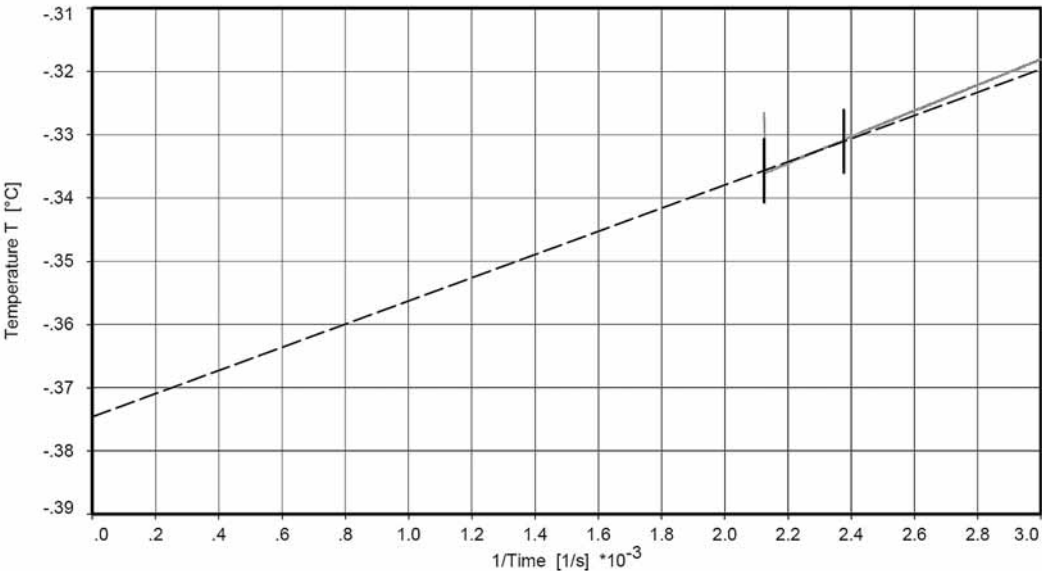


Рис. 4. Результаты замера температуры мерзлых грунтов

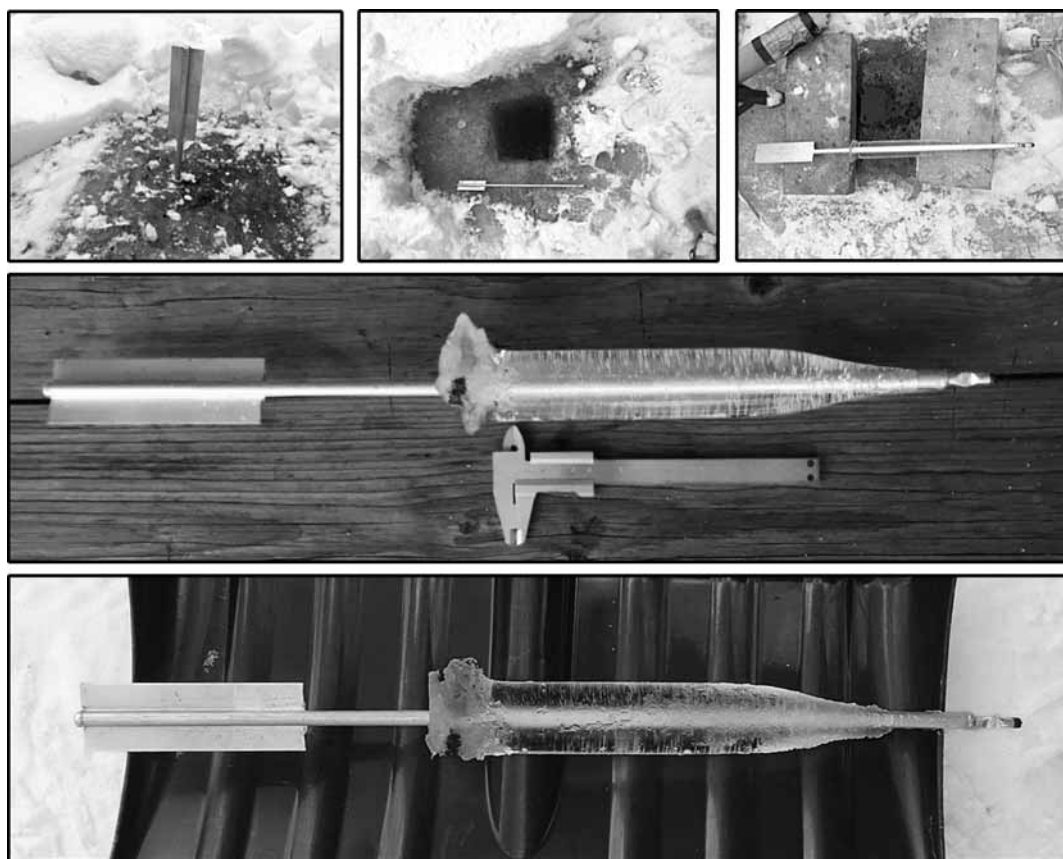


Рис. 5. Установка термостабилизатора в прорубь пресного водоема и замороженный цилиндр льда

труба диаметром 32 мм. Труба герметизируется заглушкой на забое скважины и не имеет стыков и других соединений, что исключает возможность затопления скважины подземными водами. Кроме того, вследствие малого диаметра трубы снижается погрешность измерения температуры грунта за счет уменьшения конвекции воздуха в скважине и за счет более надежной герметизации устья.

Монтаж трубы и установка термокосы проводятся в течение одного-двух часов, при этом выстойка скважины занимает минимальное время — несколько часов, так как во время статического зондирования не нарушается температурный режим грунтового массива. Это существенно сокращает время создания массива термометрических скважин на площадке по сравнению с традиционным методом. При этом технология обустройства термометрических скважин таким способом полностью соответствует требованиям ГОСТ 25358-82 [ГОСТ 25358-82].

Группа компаний «Фугро» рекомендует также устанавливать стационарные термокосы и проводить периодические измерения дистанционным способом, чтобы минимизировать воздействие внешних факторов на скважины. Таким образом, массив точек статического зондирования, оборудованных для мониторинга температуры, позволяет дистанционно получать данные и оценивать изменения состояния грунтового массива.

Разработка методики расчета тепловой мощности модели СОУ. В рамках развития программы по тестированию различных видов СОУ на Звенигородском полигоне было предложено разработать новую схему тестирования тепловой мощности СОУ. Существующие методики расчета температурного режима мерзлых грунтов, промораживаемых или охлаждаемых сезонно-охлаждающими устройствами или термостабилизаторами, основаны на решении задачи Фурье с помощью конечно-разностных схем на ЭВМ. Эта методика, однако, имеет до сих пор неразрешенную проблему: каким образом установить температурное условие на границе СОУ–грунт? Существуют разные методики: одни используют среднемесячные значения температуры воздуха и коэффициент теплообмена, другие средние значения теплового потока, предварительно рассчитанные в зависимости от температуры воздуха и ряда других параметров. Однако подбор этих параметров носит субъективный характер и зависит от специалиста (от его опыта, взгляда на проблему, отношения к заказчику и пр.). (Пока не разработана методика, основанная на объективном подходе в назначении температурных граничных условий.)

Для решения поставленной задачи была выполнена новая модель СОУ в небольшом масштабе (рис. 5). Диаметр трубы составляет 10 мм. Длина термостабилизатора или тепловой трубы 560 мм.

Оребрение у СОУ выполнено в виде пластины (44×137 мм), чтобы при расчете теплосъема в поверхности оребрения СОУ можно было бы применить более простые, отработанные и надежные эмпирические формулы, которые используются на протяжении десятков лет в теплотехнике. СОУ выполнено из алюминиевого сплава. Тепловой агент внутри тепловой трубы — пентан. Тепловая труба — двухфазная. Количество теплового агента строго дозировано, чтобы внутри тепловой трубы агент «покрывал» тонкой пленкой стенки трубы и оставшийся объем был заполнен парами (газообразной фазой агента). Однако в целях изучения и демонстрации влияния работы жидкой фазы теплового агента в используемую трубу агент был закачан с избытком, поэтому при температуре 0°C в тепловой трубе при вертикальном положении в зоне испарения накапливался столб из жидкого агента высотой 100 мм. Методика теста достаточно проста (рис. 5). Ее ранее в 1990-х гг. использовала компания «Интер Хит Пайп» [http://iheatpipe.ru/history_retro.html]. СОУ было установлено в пресный водоем, как показано на рис. 5, на 18 ч 40 мин (67 200 с) — с 15:00 18 января по 09:40 19 января 2017 г. В этот промежуток времени температура воздуха менялась от -6 до -8°C (среднее значение за указанный период в -7°C). Вокруг СОУ сформировался цилиндр льда общей массой 165 г. Диаметр цилиндра составил 35 мм при диаметре трубы испарителя 10 мм. Исходя из полученных данных можно рассчитать тепловую мощность СОУ. Для замораживания 165 г воды необходимо потратить

$$165 \text{ г} \cdot 335 \text{ Дж/г} = 55\,275 \text{ Дж.}$$

Пренебрегая другими значениями теплопереноса при работе термостабилизатора, тепловая мощность СОУ в данных условиях будет равна

$$55\,275 \text{ Дж} / 67\,200 \text{ с} = 0,82 \text{ Вт.}$$

Такой результат имеет большую ценность из-за наглядности и простоты опыта. Каждый тест, выполненный по этой методике, легко верифицировать, поскольку наглядно видно, сколько льда наморозило СОУ за тот или иной период времени. Форма цилиндра льда показывает эффективность работы СОУ и наличие температурного градиента. При тестировании четко видно, что на конце испарительной части СОУ вода замерзла. Ниже уровня, на который был с избытком залит агент, ледяной цилиндр переходит в конус и полностью исчезает. Этот факт наглядно подтверждает, что теплосъем испарителя, где агент залит с избытком (что сегодня норма у большинства производителей) крайне низок и промораживание и/или охлаждение в этой зоне испарителя не происходит.

В рамках Звенигородской практики предлагаем организовать постановку новой задачи,

где студенты выполняли бы короткие тесты по промораживанию воды в пресном водоеме. При их проведении можно рассматривать влияние различных факторов на эффективность работы СОУ, таких, как температура воздуха, скорость ветра и др. Набор данных эмпирической базы при проведении такого тестирования позволит отработать новую методику задания температурных условий на границе СОУ–грунт.

В рамках проведения Дня науки и инноваций продемонстрировано применение в зимних условиях технологии электротомографии — современной модификации метода сопротивлений. Электрическая томография (электротомография) представляет собой модификацию метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с использованием многоканальных (многоэлектродных) установок. В этой модификации метода ВЭЗ вдоль профиля наблюдений устанавливается набор электродов, расположенных через равные промежутки. При проведении измерений электроды многократно используются в качестве как приемных, так и питающих. Применение метода электротомографии регламентируется в нормативных документах [СП 11-105-97, ч. VI] для детальных исследований двумерно неоднородных сред. Практический опыт показывает, что электрическая томография хорошо зарекомендовала себя при изучении сложностроенных сред, уточнении строения верхней части геологического разреза и выявлении локальных неоднородностей, изучении карстово-суффозионных процессов, картировании зеркал скольжений оползневых тел, при исследовании мерзлотных козырьков и вялой мерзлоты, а также при решении других задач. Дополнительное преимущество технологии — возможность использовать данные о рельефе в качестве исходного материала наряду с измеренными значениями кажущегося сопротивления для расчета геоэлектрической модели среды, что позволяет применять этот метод на любом рельефе, даже при его весьма существенных превышениях.

В рамках проведения Дня науки и инноваций была продемонстрирована работа российской 16-канальной 64-электродной электротомографической станции «Скала 64» (производитель ООО «КБ Электрометрии», Новосибирск). Эта станция поддерживает работу по различным электроразведочным протоколам, включая установки Веннера, Шлюмберже, дипольную осевую, трехэлектродную (прямую и обратную), двухэлектродную.

Демонстрационные работы проводились по профилю, расположенному вдоль центральной дороги Звенигородского полигона (рис. 6). Шаг по профилю между электродами составлял 3 м. Работы выполнялись по протоколу встречной (комбинированной) трехэлектродной установки AMN–MNB, который обеспечивает максимальную глубину и детальность исследований.

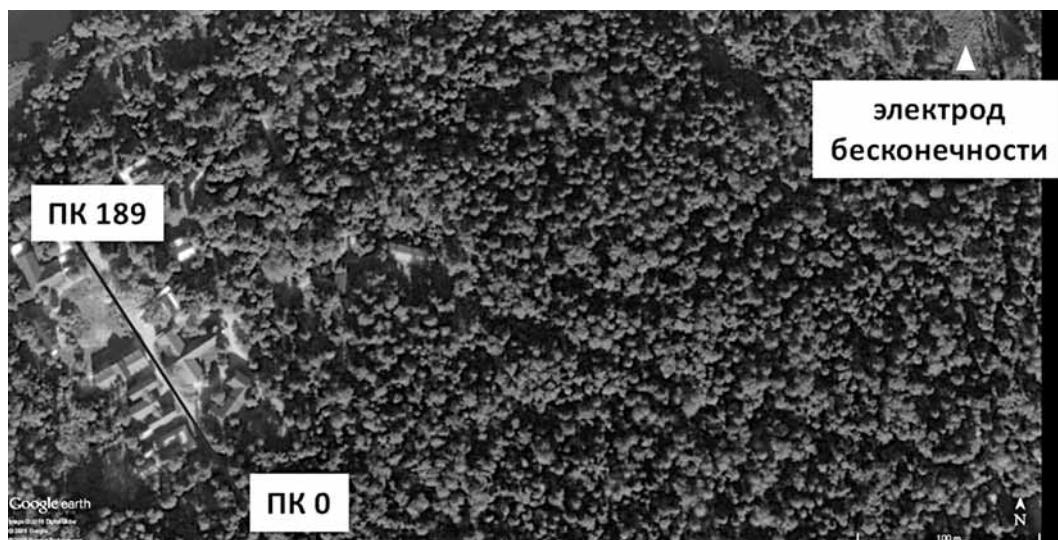


Рис. 6. Расположение на местности профиля электротомографии и электрода бесконечности

Детальность выполненных работ в переводе на точки физических наблюдений составила 64 точки ВЭЗ с шагом по профилю 3 м в двух направлениях (AMN и MNB). Длина профиля при этом составила 189 м, максимальный разнос АО 90 м. Электрод бесконечности был установлен напротив центральной части профиля на расстоянии 400 м.

Проведение электроразведочных работ методом сопротивлений в зимнее время имеет определенную специфику, так как качество получаемых полевых данных сильно зависит от значений переходных сопротивлений между грунтом и электродами. С помощью современных электротомографических станций возможно непосредственно перед проведением измерений произвести замер значений переходного сопротивления.

В нашем случае значения переходного сопротивления между грунтом и электродами, забитыми в мерзлый грунт при помощи пробойника и кувалды неудовлетворительно высокие, варьирующие от 30 до 100 кОм. В качестве эксперимента нами выполнены измерения кажущегося сопротивления

при таких высоких значениях переходного сопротивления (рис. 7).

Для улучшения качества заземлений и снижения значений переходного сопротивления было применено техническое решение, предложенное О.И. Комаровым в 2010 г. и опробованное в ходе большого количества работ. Под каждый электрод при помощи мобильного генератора и перфоратора с длинным буром в грунте выбуривали отверстие глубиной 0,6–0,7 метра (рис. 8). В пробуренное отверстие заливали рассол, погружали и добывали электрод. Такая методика установки электродов позволяет существенно снизить значения переходного сопротивления в зимнее время. В нашем случае после проведенных мероприятий по улучшению качества заземлений значения переходных сопротивлений не превышали 5 кОм (в основном 0,7–1,5 кОм) (рис. 9).

В итоге проведенных мероприятий получены качественные полевые данные (рис. 10), пригодные для дальнейшей обработки и интерпретации.

В результате первичной обработки был подготовлен файл данных для построения гео-

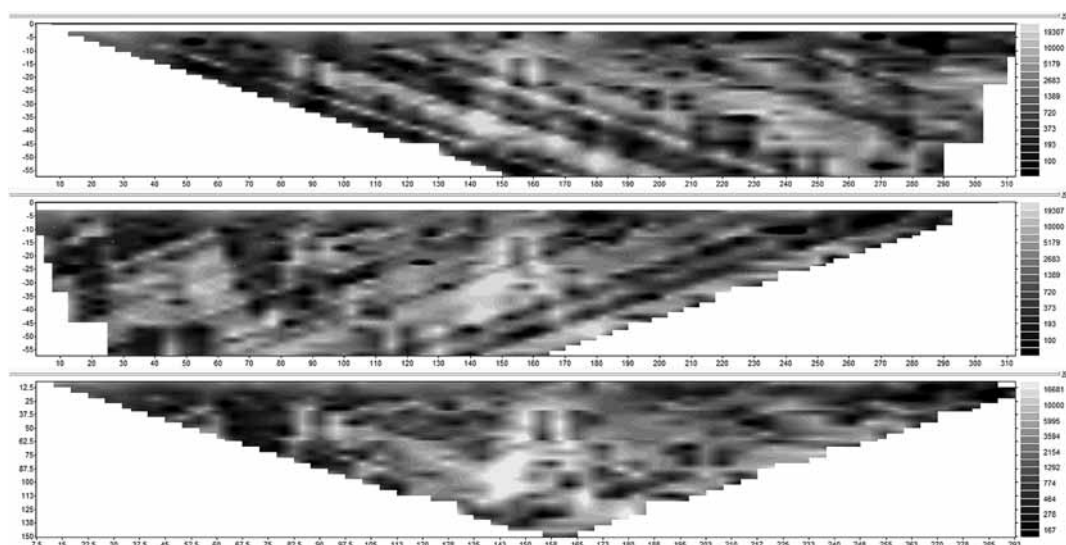


Рис. 7. Неудовлетворительное качество полевых материалов, измеренных при высоких значениях переходного сопротивления. Вверху — псевдоразрез AMN, в середине — MNB, внизу — результирующий AMNB



Рис. 8. Бурение отверстий под электроды

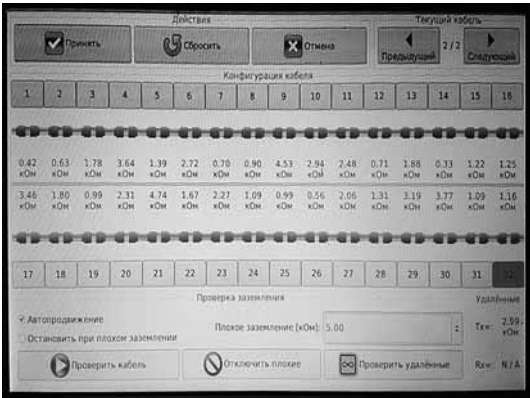


Рис. 9. Значения переходных сопротивлений после мероприятий по улучшению качества заземлений

электрической модели. Интерпретация данных электротомографии выполнялись в рамках двумерного класса моделей при помощи специального программного обеспечения. Подбор геоэлектрической модели среды осуществлялся с помощью процедуры двумерной автоматической инверсии измеренного поля кажущегося сопротивления. Двумерная инверсия — алгоритм, который пересчитывает наблюдаемое электрическое поле в соответствующее ему двумерное распределение удельного сопротивления. При таком подходе в поиске решения учитывается вся совокупность измеренных данных.

При изменении параметров подбора модели, введении априорной информации в базовую модель, применении различных алгоритмов фильтрации и сглаживания оператор влияет на получаемый результат. После введения необходимых параметров программа автоматически рассчитывает математическую модель среды и строит геоэлектрический разрез. Так как такая задача некорректная, используется регуляризация решения за счет моделей с плавным изменением удельного сопротивления. Из-за интегрального характера метода сопротивлений полученное решение, как

правило, упрощает и сглаживает реальные детали геологического строения разреза. Кроме того, на разрезе могут появляться ложные аномалии, связанные с объектами, расположенными рядом с профилем наблюдений и неустойчивостью инверсии. Отдельную проблему представляют очень контрастные объекты техногенного происхождения (например, магистрали коммуникаций водоснабжения и канализации и т.п.). Значения глубины по результатам поверхностных геофизических исследований определяют оценочно из-за наличия эквивалентных связей между сопротивлением и мощностью грунтов. В результате интерпретации получен геоэлектрический разрез по профилю исследований (рис. 11).

Полученный геоэлектрический разрез имеет сложное строение. В верхней части до глубины 3–4 м на ПК 42–69, ПК 99–129, ПК 144–189 ярко выделяются линзовидные зоны, характеризующиеся высокими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС), варьирующими в диапазоне 1500–5000 Ом·м, литологически соответствующие дренированным пескам. На ПК 0–42, ПК 69–99 в приповерхностной части наблюдаются грунты, характеризующиеся средними

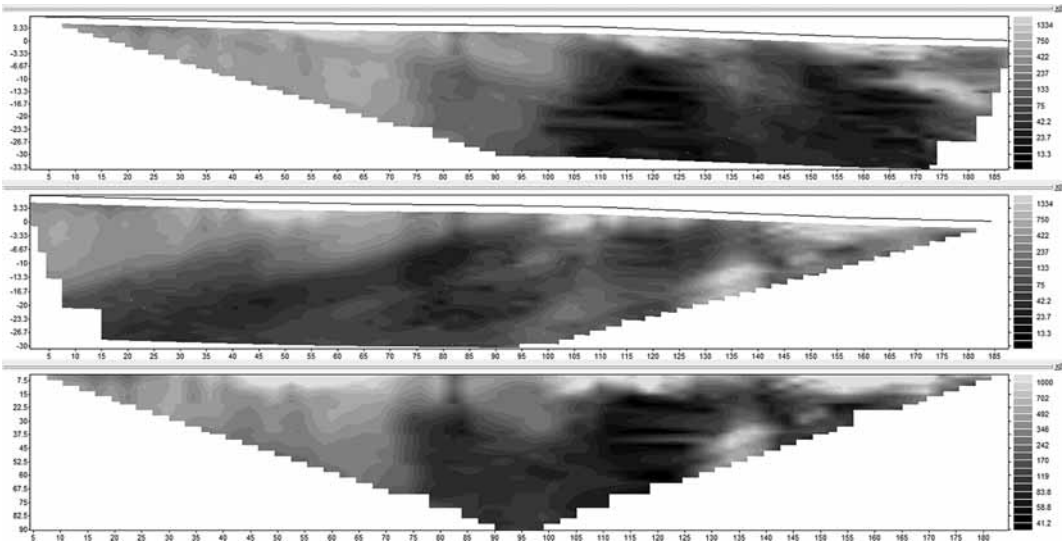


Рис. 10. Псевдоразрезы кажущихся сопротивлений сверху — AMN, в середине — MNB, внизу результирующий — AMNB

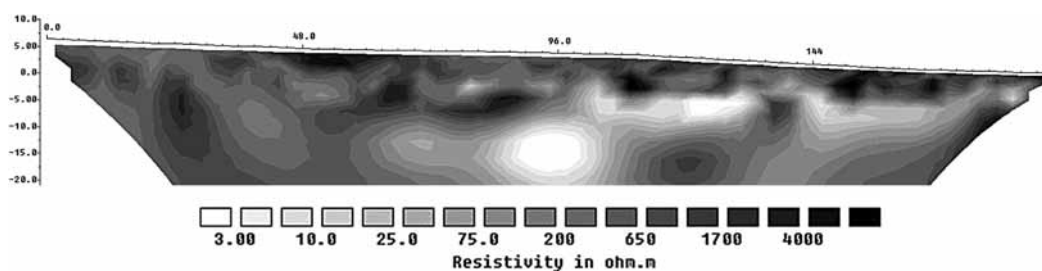


Рис. 11. Геоэлектрический разрез по профилю исследований

значениями УЭС, варьирующими в диапазоне 100–300 Ом·м и что, судя по всему соответствует супесчаным влажным грунтам. В диапазоне ПК 99–189 на глубине 7–12 м выделяется низкоомный слой с УЭС грунтов 10–30 Ом·м, которому, видимо, соответствуют обводненные элювиальные отложения, представленные элювием известняка и песчано-суглинистыми грунтами. Также в районе ПК 27–48 на глубине 7 м и глубже фиксируется зона пониженного сопротивления (100–200 Ом·м), к которой, возможно, приурочены трещиноватые известняки низкой сохранности. Особо отметим аномальную зону, выделяющуюся в диапазоне ПК 78–102 на глубине 12–15 м, характеризующуюся низкими значениями УЭС (10–30 Ом·м). Этой аномалии может соответствовать зона суглинистых/глинистых грунтов, а также зона разрушенного известняка. Аномалию можно объяснить и другими причинами — такими яркими аномальными зонами на геоэлектрических разрезах часто проявляются зоны расположения коммуникаций, и как правило, протечек. Поэтому для выяснения природы этой аномалии необходимо провести заверочное бурение.

В заключение подчеркнем, что метод электромографии характеризуется высокой детальностью исследований, а несложные технические решения позволяют применять его в зимних условиях на промерзших грунтах.

Лазерное сканирование — эффективная технология получения пространственных данных с высокой точностью и скоростью, основанная на измерениях расстояния и двух углов до объекта с

использованием множества маломощных лазерных импульсов. Инструменты, выполняющие такие измерения, — это трехмерные лазерные сканеры. В результате выполненных сканерами измерений специалисты получают точки лазерных отражений, для которых вычисляются пространственные координаты (x , y , z), а также форма и интенсивность отраженного сигнала. Полученные данные используются для построения пространственных цифровых моделей измеряемых объектов. Лазерное сканирование — метод съемки, уже прочно занявший свою нишу на рынке индустрии получения объективных пространственных данных. По сравнению с традиционными методами измерений, которые обеспечивают получение лишь дискретных точечных измерений в избранных местах объектов, с помощью устройств для лазерного сканирования получают измерения поверхностей объектов целиком, что обеспечивает при этом полное покрытие их точками лазерных отражений (измерений).

По аналогии с офисными копировальными устройствами, использующими свет для того, чтобы скопировать документ линия за линией, лазерные сканеры «копируют» окружающий мир с помощью лазерных импульсов. Лазерное сканирование может быть дополнено фотограмметрической информацией об объекте съемки. В этом случае точки лазерных отражений в результате сканирования будут дополнены реальной окраской. Лазерное сканирование, в отличие от фотограмметрических методов съемки, имеет прямое, т.е. не вычисленное, измерение дальности

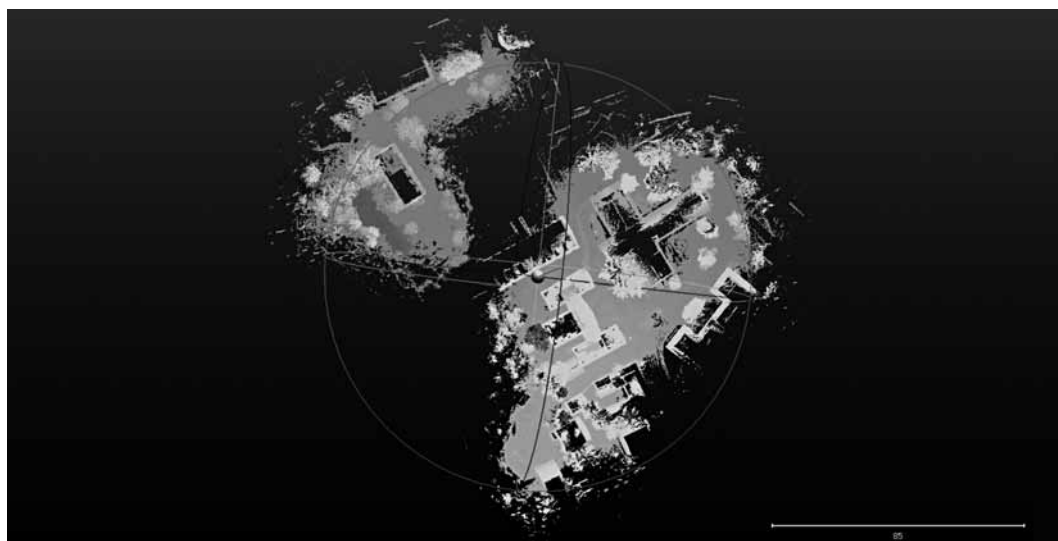


Рис. 12. Лазерное сканирование территории Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова с участками температурных наблюдений и полигоном изучения термостабилизации

Рис. 13. Снимок учебно-научного геокриологического полигона на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова с квадрокоптера Phantom 3



сти до объекта, а также не зависит от внешних факторов, таких, как освещенность, влияющих на возможность выполнения измерений в фотограмметрии. В рамках Дня науки и инноваций было проведено лазерное сканирование территории Звенигородской биостанции с участками температурных наблюдений и полигона изучения СОУ (рис. 12).

Геокриологическое картирование с помощью беспилотных летательных аппаратов. Традиционно для решения геокриологических задач — ландшафтного микрорайонирования, идентификации криогенных явлений, оценочных измерений характерных неоднородностей рельефа, снегонакопления и др. — используются методы наземной съемки. Однако в силу труднодоступности и непроходимости многих районов исследований предпочтение отдается дешифрированию аэрофотоснимков (АФС). Вместе с тем мелкое разрешение АФС не позволяет дешифрировать проявления криогенных процессов и выделять опорные участки ландшафтного микрорайонирования.

При решении локальных задач по ландшафтному микрорайонированию наиболее востребованы квадрокоптеры небольшого размера и с небольшим радиусом покрытия территории.

Во время проведения Дня науки и инноваций представитель Института геоэкологии РАН, руководитель проекта Д.О. Сергеев представил программу «Оценка микроландшафтной неоднородности с применением аэрофото- и видеосъемки с малых летательных аппаратов». Применение квадрокоптеров позволяет с высоты 50–100 м осуществлять повторяющуюся съемку полосы землеотвода протяженных линейных инженерных объектов (автодороги, железные дороги, трубопроводы) с целью получения топографически привязанных визуальных изображений и аэрофотоснимков в видимом и инфракрасном диапазоне. Эти данные позволяют выполнять ландшафтное микрорайонирование и идентификацию геокриологических явлений и экзогенных геологических процессов (оползни, сели, обвалы, лавины, камнепады и др.) [Сергеев и др., 2007].

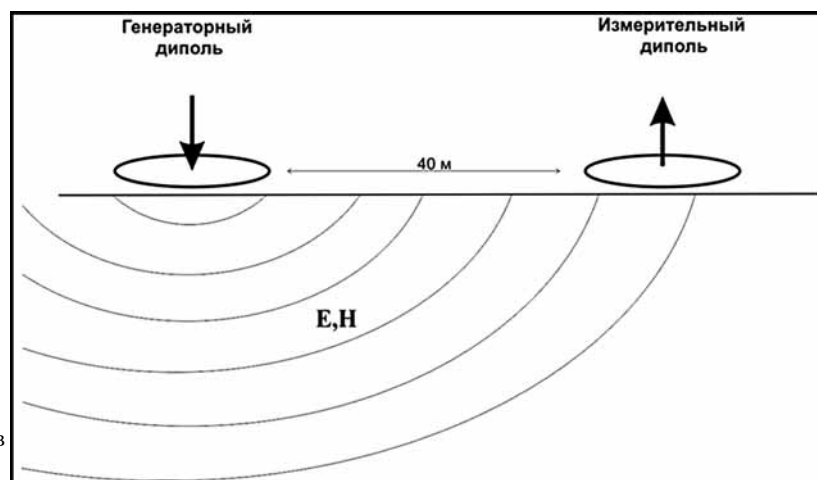


Рис. 14. Принципиальная схема в методе ВЭЗ в модификации ЧЗ



Рис. 15. Комплект аппаратуры HF-ЕМ (слева — генератор, справа — измеритель)

В рамках Дня науки и инноваций участники получили навыки по планированию и выполнению перспективной аэрофото- и видеосъемки (рис. 13), а также по обработке ее результатов для решения геоэкологических задач (обеспечение ландшафтного микрорайонирования, идентификация криогенных явлений, оценочные измерения характерных неоднородностей рельефа, снегонакопления и т.п., влияющих на условия теплообмена).

Метод частотного зондирования (ЧЗ). Этот метод относится к электромагнитным методам геофизических исследований. Геофизические исследования электромагнитными методами выполняются на участках, где проведение работ на постоянном токе (электропрофилирование, вертикальное электрическое зондирование) невозможно или затруднительно из-за отсутствия гальванической связи измерительной линии с поверхностью, например, если в разрезе присутствуют грунты с высоким электрическим сопротивлением, как в случае с сезонномерзлым слоем.

Технология ЧЗ (как разновидность электромагнитных зондирований) основана на использовании переменных электромагнитных полей. К достоинствам технологии относится бесконтактный способ возбуждения и приема электромагнитного поля, что обеспечило этим технологиям широкое применение в условиях скальных и мерзлых грунтов. В методе ЧЗ для исследования верхней части разреза используется искусственное электромагнитное поле в диапазоне частот от 4 до 1024 кГц. Поле возбуждается и измеряется на одной частоте с помощью антенн (многовитковых рамок), расположенных горизонтально на некотором расстоянии одна от другой (рис. 14).

Максимальная глубина исследований не превышает расстояние от источника до приемника. Для проведения работ методом частотных зондирований используется аппаратура HF-ЕМ (рис. 15) (производитель ООО «МГУ-Геофизика», Москва).



Рис. 16. Схема расположения профиля частотного зондирования на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова (ЗБС) (вверху) и разрез кажущегося (эффективного) электрического сопротивления по данным ЧЗ (внизу)

Метод ЧЗ был продемонстрирован на участке от преподавательского домика до въезда из Звенигородской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова (рис. 16).

Измерения проводились в непрерывном режиме измерений, генераторная и измерительная антенны были установлены на пластиковые непроводящие сани, которые приводились в движение при помощи снегохода, движущегося на малой скорости.

В результате анализа данных измерений по исследуемому профилю получен геоэлектрический разрез кажущегося сопротивления грунтов.

На разрезе выделяются зоны с повышенным электрическим сопротивлением. В верхней части разреза аномалии высокого сопротивления связаны с наличием в разрезе сезонномерзлых грунтов. Так, например, в центральной части профиля выявлена яркая аномалия высокого электрического сопротивления грунтов. Эта аномалия, вероятно, связана с расчисткой снега у ворот на въезде на станцию и как следствие с более глубоким сезонным промерзанием грунтов на этом участке. Также при продвижении к выезду на Луцинское шоссе в нижней части разреза начинают появляться породы с пониженными значениями электрического сопротивления, что может быть связано с появлением в разрезе более дисперсных пород.

Изучение СОУ на базе нового учебно-научного геоэкологического полигона. В рамках Дня науки и инноваций студенты знакомились с новым учебно-научным геоэкологическим полигоном. На нем в настоящее время функционируют 4 сезонных охлаждающих устройства (СОУ). Эти устройства широко применяются для термостабилизации грунтовых оснований при строительстве и эксплуатации сооружений в зонах распространения многолетнемерзлых пород [Вялов, 1981]. Их функционирование связано с использованием хладопотенциала атмосферного воздуха в зимний период. В России изготовлением СОУ занимаются такие предприятия, как ОАО «Фундаментпроект»,



Рис. 17. 10-метровые СОУ вертикального типа естественной циркуляции с температурными скважинами

ООО «НьюФрост», ФСА «ФундаментСтройАркос», ЗАО «Хит Пайп», ООО «Ривсмаш» и др. Глубина установки СОУ обычно ограничена 10–15 м. Характерный размер (диаметр) 33,7–57 мм, уровень температуры $-2 \div -10$ °С на контакте. В качестве хладоносителя используются: а) фреон R404a (озонобезопасный) с давлением среды $P_{\text{ср.}} = 4,67 \div 3,55$ ат и теплосъемом 10–15 Вт/м; б) аммиак — R717 с $P_{\text{ср.}} = 4 \div 2,9$ ат — наиболее эффективный по теплоотдаче хладоноситель, с теплосъемом 25–30 Вт/м.; в) углекислый газ CO_2 — R744 с $P_{\text{ср.}} = 33 \div 26$ ат и теплосъемом 12–18 Вт/м.

На Звенигородском полигоне установлены 10-метровые СОУ вертикального типа естественной циркуляции (рис. 17), при этом два термостабилизатора, где в качестве хладоносителя используется аммиак; один заполнен фреоном, один — углекислым газом. Для контроля и мониторинга работы СОУ вблизи термостабилизаторов находятся 10-метровые температурные скважины, где в качестве термодатчиков используются полупроводниковые датчики сопротивления. Показания датчиков фиксируются логгером.

К недостаткам использования таких СОУ следует отнести сезонность работы и периода установки в массив пород; относительно невысокую скорость промораживания, проблемы с промораживанием сильнозасоленных пород, а к преимуществам — отсутствие энергетических затрат и необходимости обслуживать в процессе эксплуатации.

Заключение. Современные технологии, опробованные на Дне науки и инноваций, существенно расширили традиционные полевые методы геокриологических исследований.

Собранные в рамках Дня науки и инноваций полевые материалы существенно дополнили базу инженерно-геокриологических данных, используемую при проведении инженерно-геокриологической практики студентов геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Проведенное на Дне науки и инноваций тестирование температурных кос от разных производителей позволило провести независимую оценку технических характеристик, заявленных производителями. Это позволяет рассматривать исследованную территорию в качестве испытательного полигона для специализированного полевого инженерно-геокриологического оборудования.

Работа научно-исследовательского геокриологического полигона на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова позволила провести натурные эксперименты с сезонно-охлаждающими устройствами (производства ООО РивсМаш). Эта программа направлена на исследование температурных полей около термостабилизатора, изучение эффективности использования различных агентов в качестве теплообменных жидкостей, изучение происходящих во внутритрубном пространстве фазовых переходов и влияния интенсивности фазовых переходов на работу термостабилизатора по глубине.

Картирование с помощью БПЛА существенно интенсифицирует процесс получения первичных данных для дешифрирования криогенных процессов, мерзлотного микрорайонирования и выявления площадей, находящихся при строительстве в зонах риска, благодаря заполнению ниши между маршрутными полевыми съемочными исследованиями и космической съемкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балобаев В.Т., Девяткин В.Н., Кутасов И.М. Со-временные геотермические условия существования и развития многолетнемерзлых пород // Докл. и сообще-ния II Междунар. конф. по мерзлотоведению. Вып. 1. Теплофизические процессы формирования и развития криолитозоны. Якутск, 1973. С. 11–19.

Вялов С.С., Александров Ю.А., Городецкий С.Э. и др. Термосваи в строительстве на Севере. Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1984. 148 с.

Инженерная геология России. Т. 1. Грунты Рос-сии / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.

Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокрио-логия / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1999. 526 с.

Полевые методы геокриологических исследований: Метод. руководство по учебной практике студентов гео-логического факультета МГУ / Под ред. Э.Д. Ершова и Г.И. Гордеевой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 143 с.

СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах». Приложение Л. «Определение

механических свойств и несущей способности основ-ных свай в многолетнемерзлых грунтах по результатам статического зондирования». ???

СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах». Приложение Л. «Определение механических свойств и несущей способности основ-ных свай в многолетнемерзлых грунтах по результатам статического зондирования».

Сергеев Д.О., Ухова Ю.А., Станиловская Ю.В., Рома-новский В.Е. Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах Северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // Криос-фера Земли. 2007. Т. 11. № 2. С.??

ГОСТ 25358-82. URL: <http://gostexpert.ru/data/files/25358-82/44d4973d1d81c71ce9f17a9dfb601dd6.pdf>

СП 11-105-97 часть VI. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293854/4293854049.pdf>

URL: http://iheatpipe.ru/history_retro.html

Поступила в редакцию 00.00.2018

Поступила с доработки 00.00.2018

Принята к публикации 00.00.2018