

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

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1*

Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН. 109004, Москва, Николоямская ул., 51, стр. 1

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС». 119331, Москва, пр. Вернадского 29, оф. 1104

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского» (ПКУ).
109004, Москва, ул. Земляной Вал, 73*

Moscow State University, Faculty of Geology. 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

E.M. Sergeev Institute of Geocology RAS. 109004, Moscow, Nikoloymskaya st., 51, building 1

LLC «GEOINZHSERVIS». 119331, Moscow, Prospect Vernadskogo, 29, of. 1104

FGBOU VO «K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management». 109004 Moscow, Zemlyanoy Val st., 73

В рамках Звенигородской зимней учебно-научной практики для студентов 4-го курса инженерного потока геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Дня 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 Zvenigorod winter educational-scientific geocryological field practice for student of forth year study and The day of science and innovation in Zvenigorod biological base of Lomonosov Moscow state university. Necessity of innovation methods usage was approved.

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

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: isaev@geol.msu.ru

³ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, заведующий лабораторией, канд. геол.-минер. н.; e-mail: sergeevd@mail.ru

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

⁵ ООО ГЕОИНЖСЕРВИС, вед. инженер, кандидат геол.-минер. 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.-минер. н.; e-mail: msu.geophys@gmail.com

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

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

¹⁰ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, профессор, докт. геол.-минер. 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

Введение. Территория Российской Федерации на сегодняшний день в геокриологическом аспекте (за редким исключением) представляет собой объект исследования инженеров-геокриологов в связи с распространением многолетнемерзлых пород на большей части ее территории и наличием практически повсеместно холодного сезона, формирующего сезонно-мерзлый слой грунта [Балобаев, 1973].

При этом максимальная мощность мерзлых отложений достигает 1500 м в Восточной Сибири. Многолетнемерзлые породы также прослеживаются на шельфе арктических морей и имеют сложное в структурном и физическом плане строение. Изменения температуры и давления в массиве мерзлых толщ, насыщение их углеводородами биогенного и глубинного происхождения создают неоднородный разрез мерзлых пород по глубине, сопровождающийся формированием газогидратов, а наличие солей в отложениях пород морского генезиса приводит к формированию криопэгов в мерзлой толще. Изменения температурного режима мерзлых пород ведут к оттаиванию грунтов, сопровождающемуся потерей их прочностных свойств, и как следствие к техногенным катастрофам [Основы ..., 1999]. Сложность строения и нестабильность состояния мерзлого массива ставят перед инженерно-геологической отраслью следующие задачи: сбор достоверной и оперативной информации о грунтовом массиве, находящемся в зоне отрицательных значений температуры; прогноз состояния мерзлого массива, учитываяющего климатический тренд для исследуемого региона и техногенную нагрузку при освоении конкретной территории; обоснование палеореконструкций климатических условий формирования мерзлых толщ на изучаемой территории, основывающихся на знании закономерностей формирования криосферы.

При подготовке специалистов для решения поставленных инженерно-геокриологических задач кафедра геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова проводит практику для студентов 4-го курса инженерного потока по программе «Полевые методы геокриологических исследований» [Полевые ..., 1986]. Практика проводится на территории Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова, 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).

Овладение полевыми методами инженерно-геокриологических исследований позволяет специалистам-геокриологам своевременно получать необходимую информацию, составлять прогноз развития криогенных процессов, предлагать наиболее эффективные методы борьбы с криогенными процессами и явлениями, отталкиваясь от традиционной методики 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); трехмерная 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 для выявления ее недостатков и преимуществ. Это позволяет провести экспертную оценку изыскательского оборудования, что, безусловно, влияет на качество проводимых инженерных работ. В этом году были протестированы температурные косы разных производителей.

Сравнение результатов измерения температуры среди температурными косами разных производителей. Эксперимент проведен на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова в период с 12:30 23 января по 9:30 24 января 2017 г. В сравнении участвовали: термокоса и логгер В.Х. Кирьякова (Россия, ИЗМИРАН); термокоса и логгер В.А. Дубровина (Россия, ВСЕГИНГЕО–ИКИ); термокоса и логгер компании «GeoPrecision» (Германия) [URL: <http://www.geoprecision.com/>]; термокоса и логгер компании «НОВО» (США) [URL: <http://www.onsetcomp.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 и 2) датчики располагали снаружи смотки, а более компактные у кос № 3 и 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, а). Все косы были положены в снежную яму на глубину около 30 см на одном

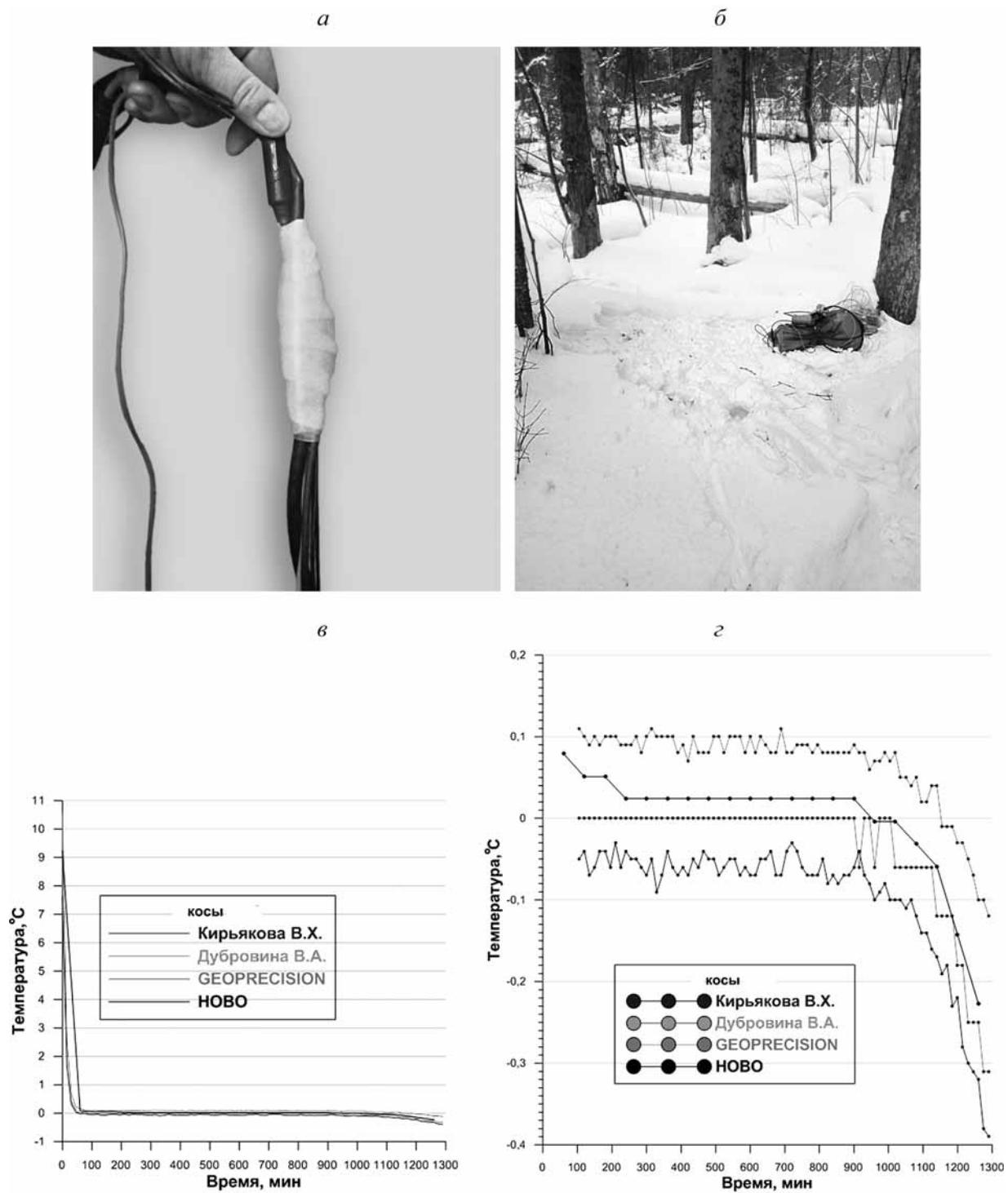


Рис. 1. Блок термодатчиков (а), площадка эксперимента (б), сравнение результатов измерения температуры среды температурными косами разных производителей (в, г): в — полный цикл; г — в интервале температуры $-0,4\text{--}0,1$ °С

уровне одна рядом с другой и засыпаны слегка утрамбованным снегом, а логгеры лежали в сумке рядом (рис. 1, б).

Измерения температуры проводились через 15 мин, часы всех логгеров перед установкой были сверены и не отличались 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 ИЗМИРАН). На рис. 1, в, г приведены два графика

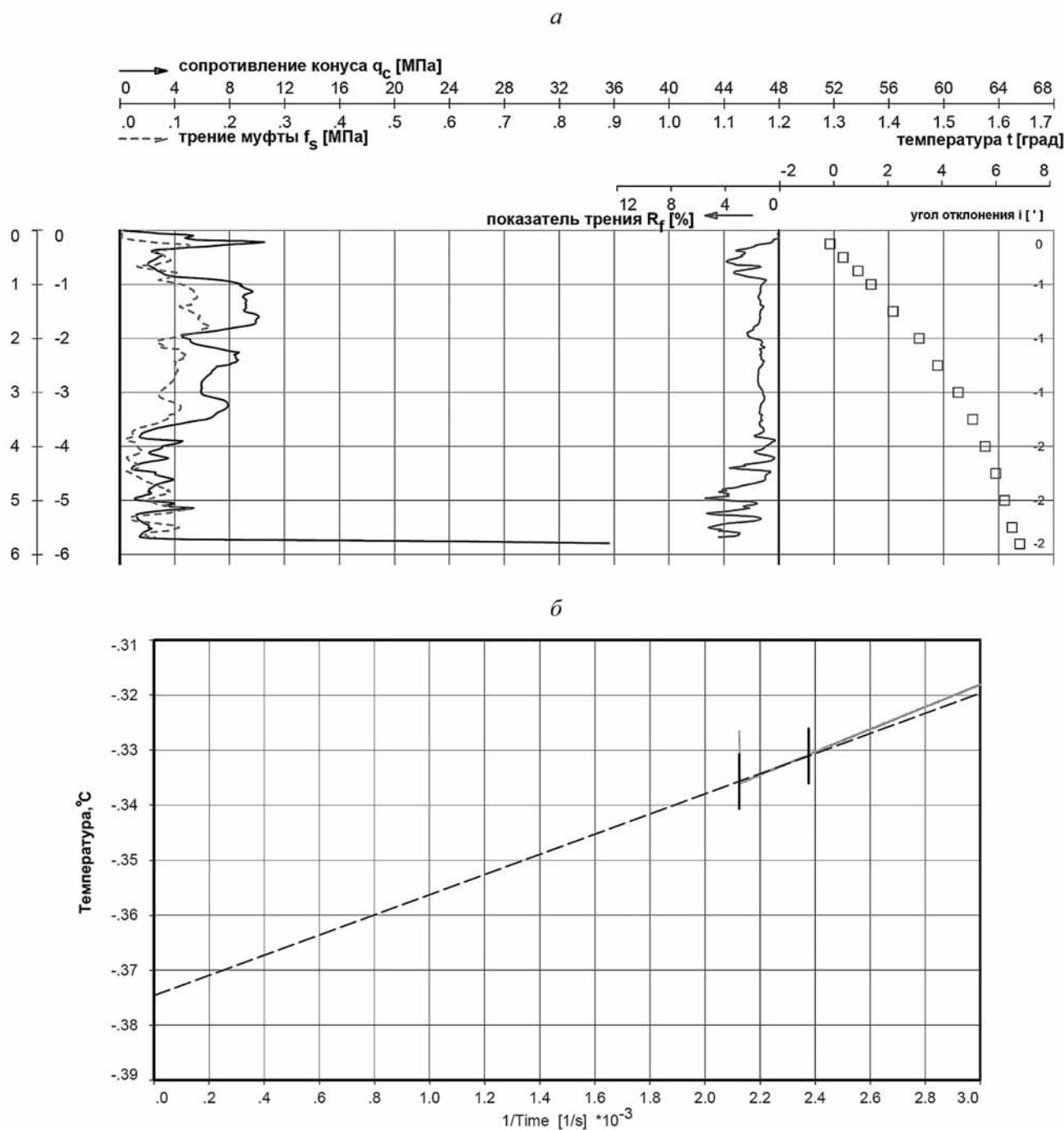


Рис. 2. Результаты статического зондирования грунтов на площадке с СОУ (*a*) и измерения температуры мерзлых грунтов (*b*)

для каждой смотки (σ — за все время измерений, включая начальную выстойку, она составила 50–100 мин; τ — 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 сезонно-охлаждающих устройств (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 статического зондирования. Технология статического зондирования заключается в процессе внедрения зонда-конуса в грунт, при котором измеряются следующие параметры: лобовое сопротивление вдавливанию, трение по боковой поверхности, температура, поровое давление и ряд других параметров в зависимости от выбранной компоновки. При испытаниях на Звенигородском полигоне измеряли лобовое сопротивление вдавливанию, трение по боковой поверхности и

температуру грунтов. На рис. 2, а, б представлены результаты испытаний, которые фиксируют точку отсчета для мониторинга грунтовых условий на исследуемой площадке.

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 пластично-мерзлом 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. К преимуществам метода относится возможность получать данные о температуре 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 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 1–2 ч, 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].

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? Пока не разработана методика, основанная на объективном подходе к назначению температурных граничных условий.

Для решения поставленной задачи выполнена новая модель СОУ в малом масштабе (рис. 3). 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 с поверхности оребрения СОУ можно было 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

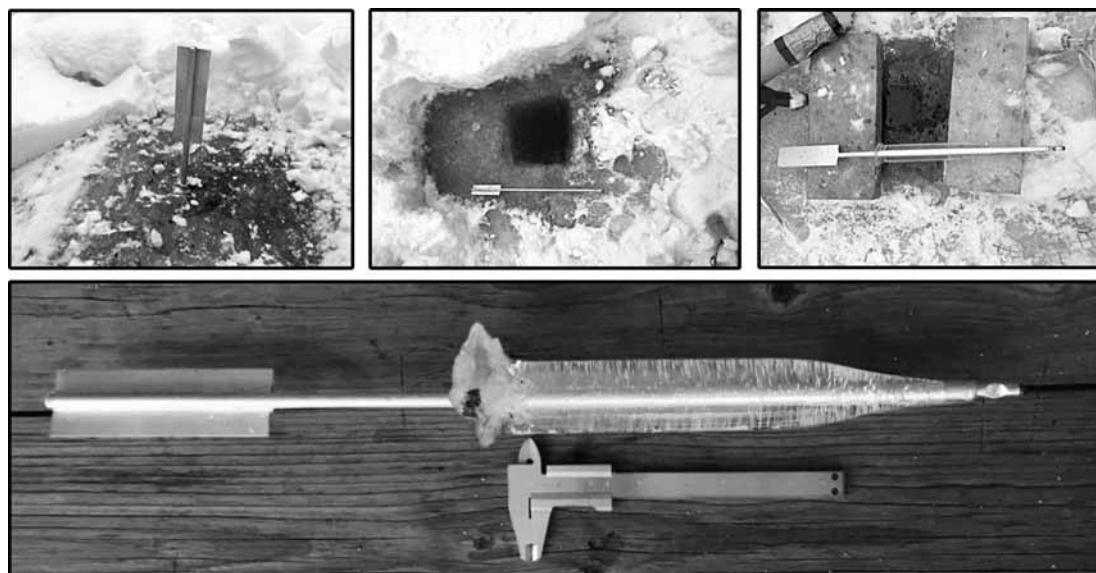


Рис. 3. Установка термостабилизатора в прорубь пресного водоема (вверху) и намороженный цилиндр льда (внизу)

теплового агента строго дозировано, чтобы внутри тепловой трубы агент покрывал тонкой пленкой стенки трубы, а 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 излишком, 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. 3), ее в 1990-х гг. использовала компания «Интер Хит Пайп» [URL: http://iheatpipe.ru/history_retro.html].

СОУ было установлено в пресный водоем, как показано на рис. 3, 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 составило –7 °C. Вокруг СОУ сформировался цилиндр льда общей массой 165 г. Диаметр цилиндра достиг 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 г · 335 Дж/г = 55 275 Дж.

Если пренебречь другими значениями теплопереноса при работе термостабилизатора, то 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 не замерзала. Ниже уровня, на который был с излишком залит агент, цилиндр переходит в конус и полностью исчезает. Этот факт наглядно подтверждает, что теплосъем испарителя, где агент залит с излишком (что сегодня норма у большинства производителей этой техники), крайне низок, и промораживание и/или охлаждение в этой зоне испарителя не происходит.

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 электротомогра-

фии регламентируется в нормативных документах [СП 11-105-97, ч. VI, 1997] для детальных исследований двумерно-однородных сред. В рамках проведения Дня науки и инноваций была продемонстрирована работа российской 16-канальной 64-электродной электротомографической станции «Скала 64» (производитель ООО «КБ Электрометрия», Новосибирск).

Демонстрационные работы проводились по профилю, расположенному вдоль центральной дороги Звенигородского полигона (рис. 4). Шаг по профилю между электродами составлял 3 м. Работы выполнялись по протоколу встречной (комбинированной) трехэлектродной установки АМН–МНВ, который обеспечивает максимальную глубину и детальность исследований.

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 можно непосредственно перед проведением измерений измерить значения переходного сопротивления.

В нашем случае значения переходного сопротивления между грунтом и электродами, забитыми в мерзлый грунт при помощи пробойника и кувалды, неудовлетворительны и варьируют от 30 до 100 кОм. В качестве эксперимента нами выполнены измерения кажущегося сопротивления при таких высоких значениях переходного сопротивления (рис. 4, б).

Для улучшения качества заземлений и снижения значений переходного сопротивления было применено техническое решение, предложенное О.И. Комаровым в 2010 г. Под каждый электрод при помощи мобильного генератора и перфоратора с длинным буром в грунте выбуривали отверстие глубиной до 0,6–0,7 м (рис. 5, б). В пробуренное отверстие заливали рассол, погружали и добивали 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 переходного сопротивления не превышали 5 кОм (как правило, 0,7–1,5 кОм) (рис. 5, а). В итоге проведенных мероприятий получены качественные полевые данные (рис. 5, в), пригодные для дальнейшей обработки и интерпретации.

В результате первичной обработки был подготовлен файл данных для построения геоэлектрической модели. Интерпретация данных электротомографии выполнялась в рамках двумерного класса моделей при помощи специального программного обеспечения. Подбор геоэлектрической модели среды осуществлялся с помощью процедуры двумерной автоматической

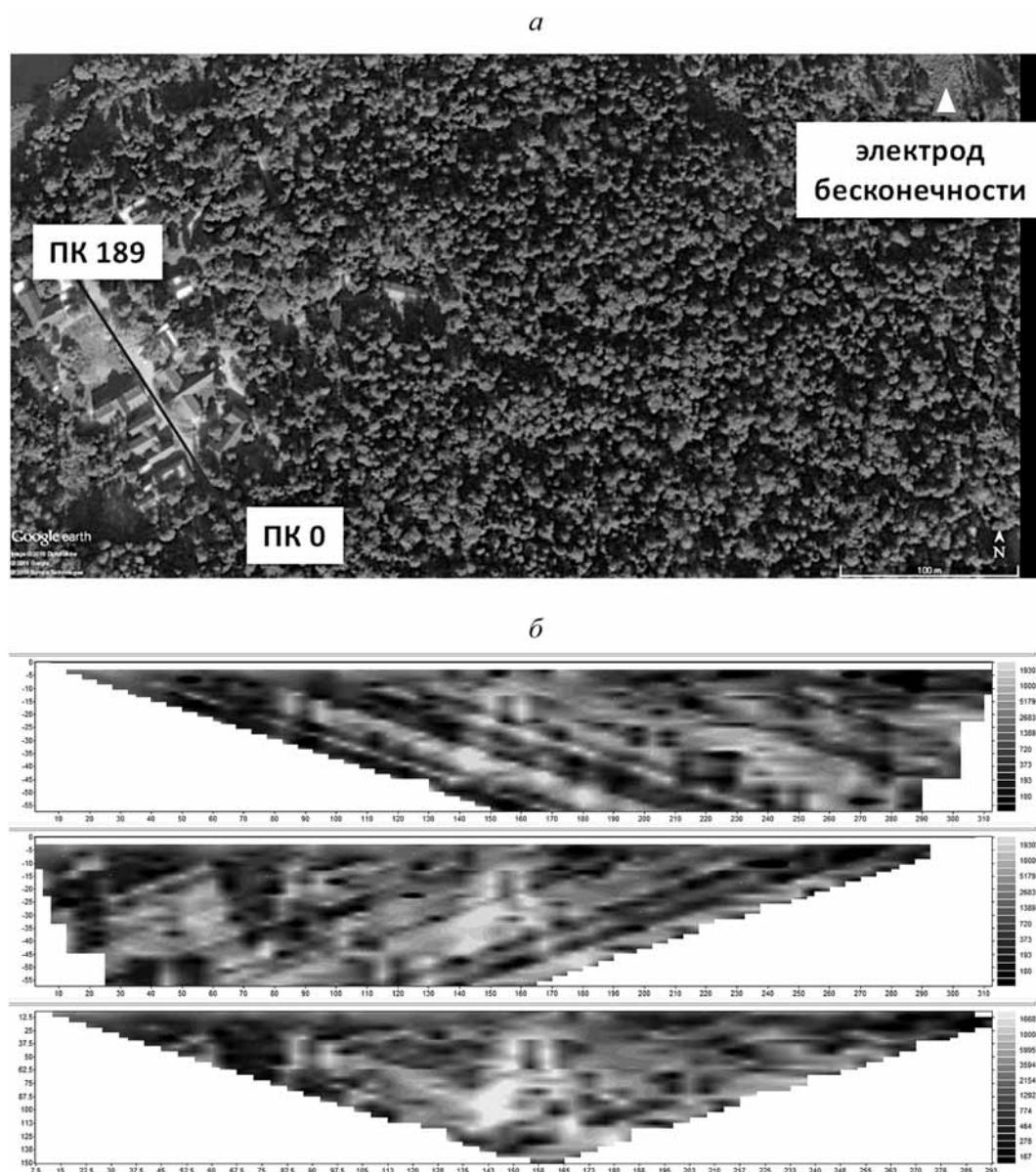


Рис. 4. Расположение на местности профиля электротомографии и электрода бесконечности (а) и неудовлетворительное качество полевых материалов, измеренных при высоких значениях переходного сопротивления (б). На б: вверху псевдоразрез АМН, в середине МНБ, внизу результирующий разрез АМНБ

инверсии измеренного поля кажущегося сопротивления. В результате интерпретации получен геоэлектрический разрез по профилю исследований (рис. 5, г).

Подчеркнем, что метод электротомографии 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 основана на измерениях расстояния и двух углов до объекта с использованием множества маломощных лазерных импульсов. Инструменты, выполняющие такие измерения, — 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.

По сравнению с традиционными методами измерений, которые обеспечивают получение лишь дискретных точечных измерений в выбранных местах объектов, с помощью устройств для лазерного сканирования получаются измерения поверхностей объектов целиком, что обеспечивает при этом полное покрытие их точками лазерных отражений (измерений).

По аналогии с офисными копировальными устройствами, использующими свет, 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. В рамках Дня науки и инноваций было проведено лазерное сканирование территории Звенигородской био-

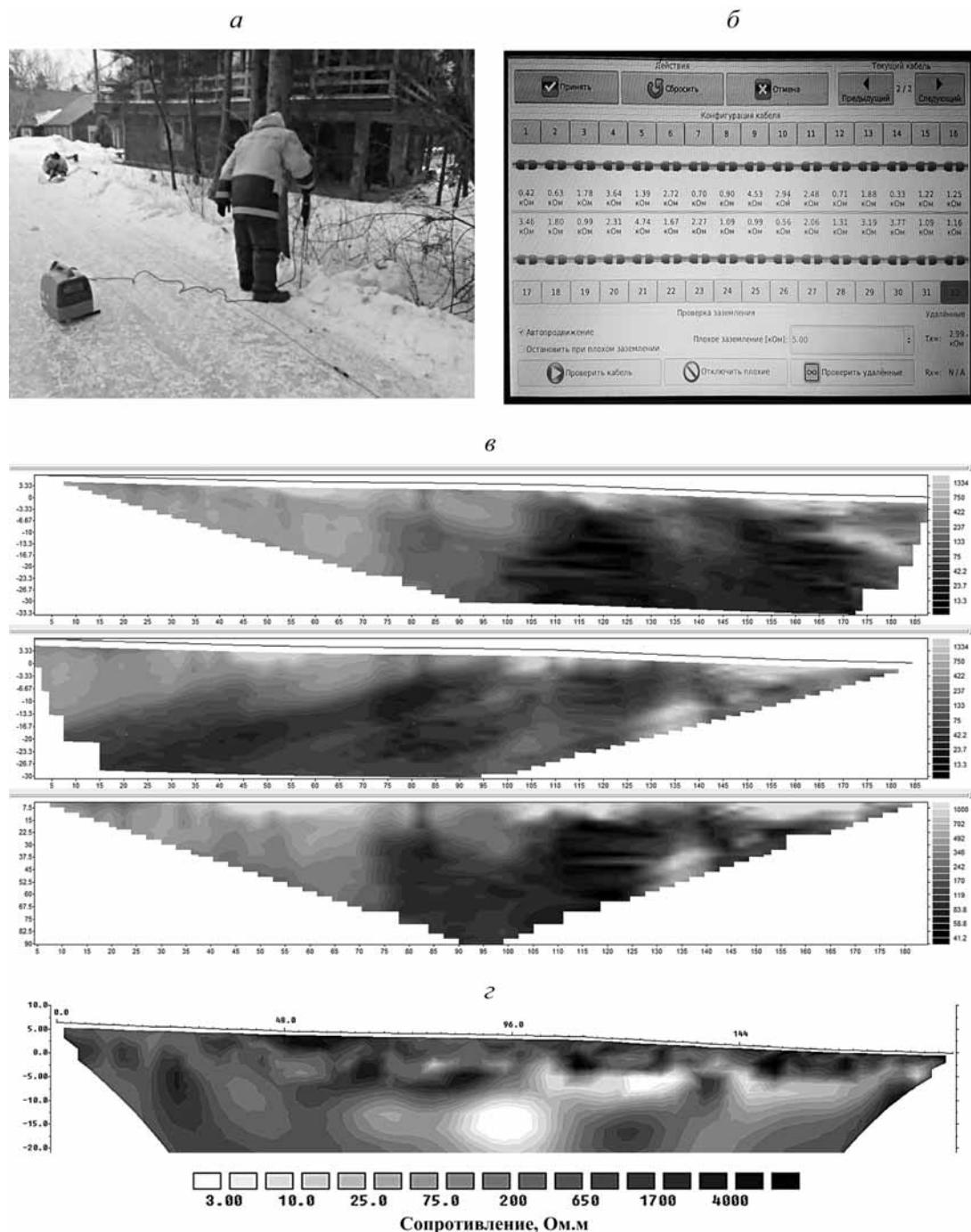


Рис. 5. Бурение отверстий под электроды (а), значения переходных сопротивлений после мероприятий по улучшению качества заземлений (б), псевдоразрезы кажущихся сопротивлений (в): вверху — АМН, в середине — МНВ, внизу результирующий — АМНВ; и геоэлектрический разрез по профилю исследований (г)

станции с участками температурных наблюдений и полигона изучения СОУ (рис. 6, а).

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 аэро-

фотоснимков (АФС). Вместе с тем мелкое разрешение АФС не позволяет дешифрировать проявления криогенных процессов и выделять опорные участки ландшафтного микрорайонирования. При решении локальных задач ландшафтного микрорайонирования 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

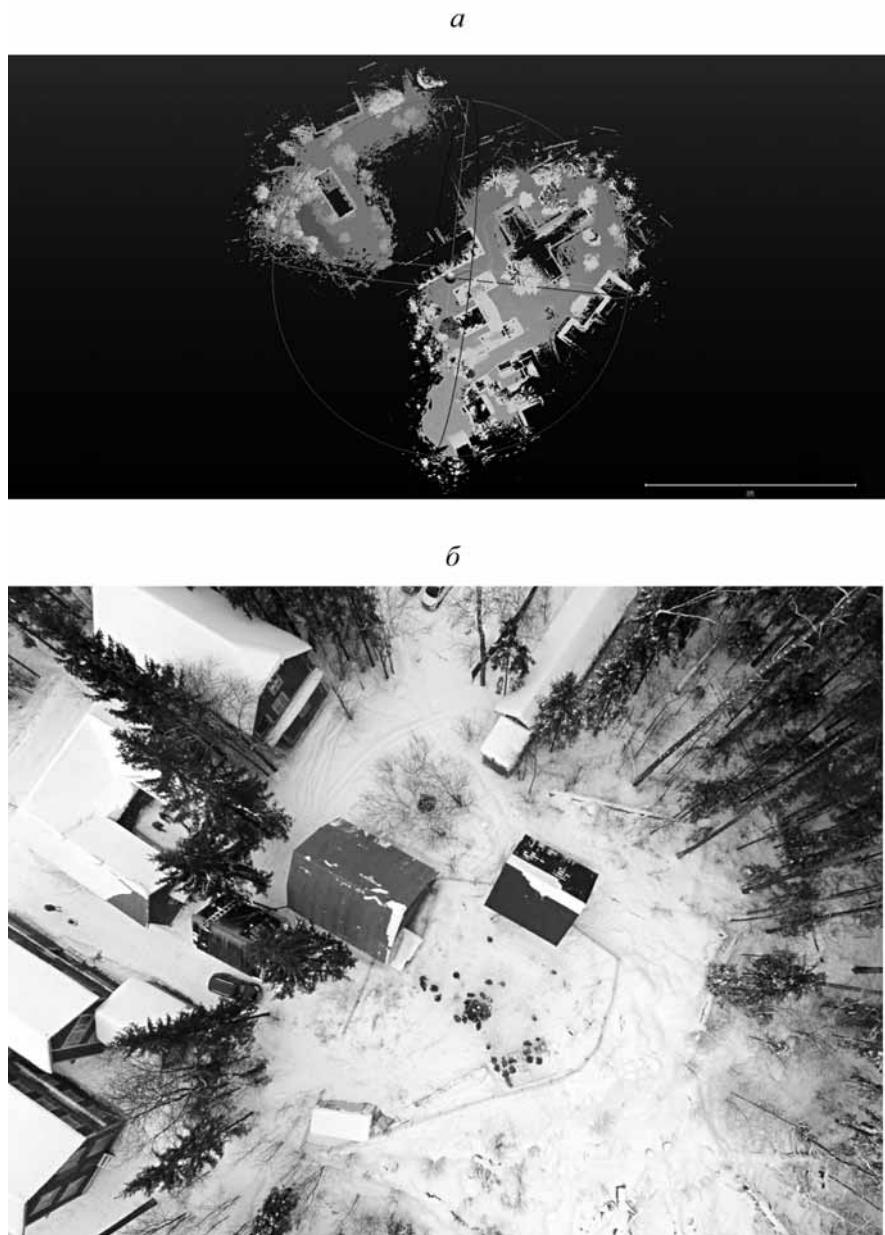


Рис. 6. Результаты лазерного сканирования участков температурных наблюдений и полигона изучения термостабилизации на территории Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова (а) и фото учебно-научного геокриологического полигона на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова с квадрокоптером «Phantom 3» (б)

неоднородности с применением аэро-, фото- 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].

В рамках Дня науки и инноваций участники получили навыки по планированию и выполнению перспективной аэрофото- и видеосъемки (рис. 6, б), а также по обработке ее результатов для решения геокриологических задач (обеспечение ландшафтного микрорайонирования, идентифи-

кация 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. Сущность технологии заключается в создании на поверхности геологической среды электромагнит-

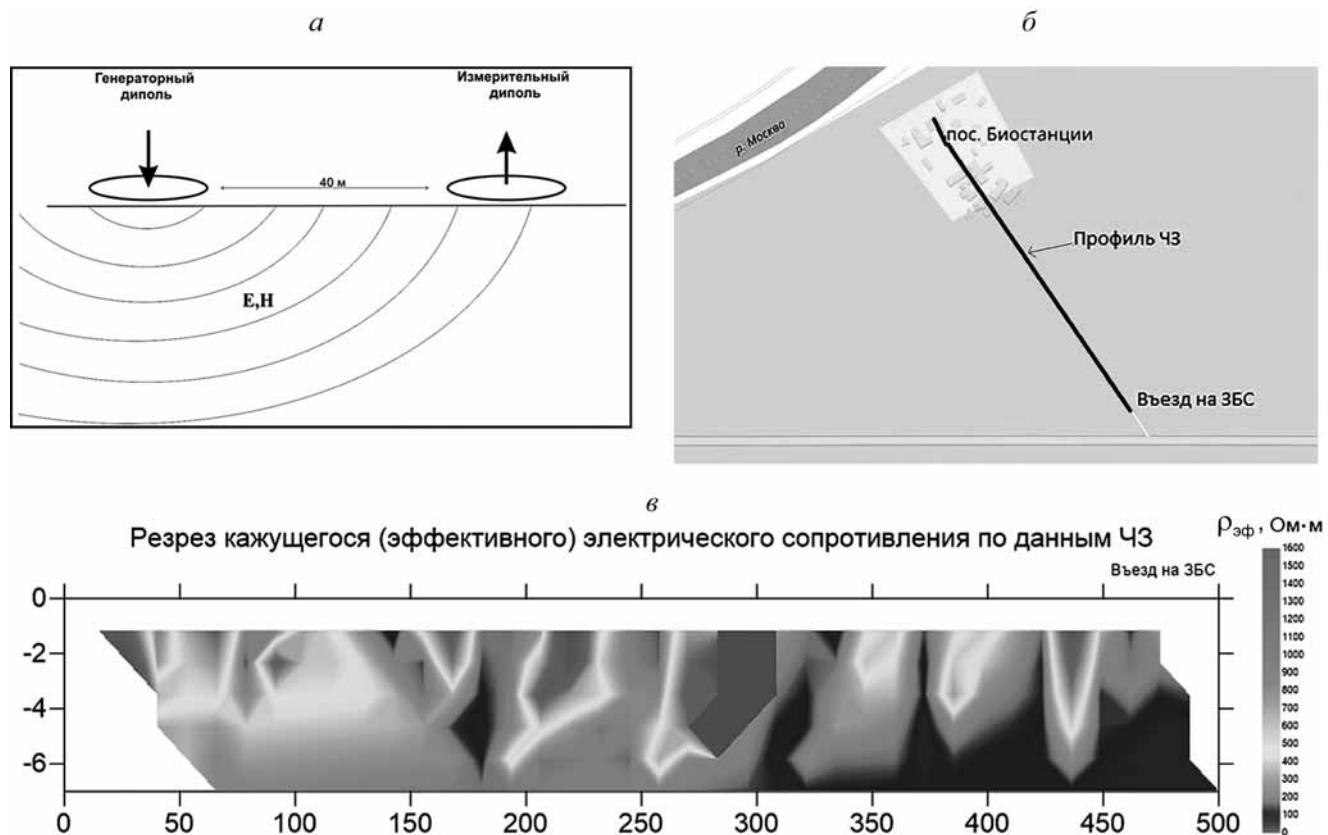


Рис. 7. Принципиальная схема в методе ВЭЗ в модификации ЧЗ (а), схема расположения профиля частотного зондирования на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова (ЗБС) (б), разрез кажущегося (эффективного) электрического сопротивления по данным ЧЗ (в)

ного поля. Поле возбуждается и измеряется на одной частоте с помощью антенн (многовитковых рамок), расположенных горизонтально на некотором расстоянии одна от другой (рис. 7).

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

В рамках Дня науки и инноваций силами сотрудников кафедры геокриологии МГУ имени М.В. Ломоносова студентам был продемонстрирован метод ЧЗ на участке от преподавательского дома до выезда с территории Звенигородской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова (рис. 7). Измерения проводились в непрерывном режиме, 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 (рис. 7, в).

Изучение СОУ на базе нового учебно-научного геокриологического полигона. В рамках Дня науки и инноваций студентов знакомили с новым учебно-научным геокриологическим 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. Глубина установки СОУ обычно ограничена 10–15 м. Характерный размер (диаметр) — 33,7–57 мм, уровень температуры $-2\text{--}10^{\circ}\text{C}$ на контакте. В качестве хладоносителя используются: а) фреон R404a (озонобезопасный) с давлением среды $P_{\text{ср}} = 4,67\text{--}3,55$ атм и теплосъемом 10–15 Вт/м; б) аммиак R717 с $P_{\text{ср}} = 4\text{--}2,9$ атм — наиболее эффективный по теплоотдаче хладоноситель с теплосъемом 25–30 Вт/м; в) углекислый газ CO₂ R744 с $P_{\text{ср}} = 33\text{--}26$ атм и теплосъемом 12–18 Вт/м.

На Звенигородском полигоне установлены 10-метровые СОУ вертикального типа естественной циркуляции (рис. 8), при этом два термостабилизатора, где в качестве хладоносителя используется аммиак; один заполнен фреоном, другой — 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.

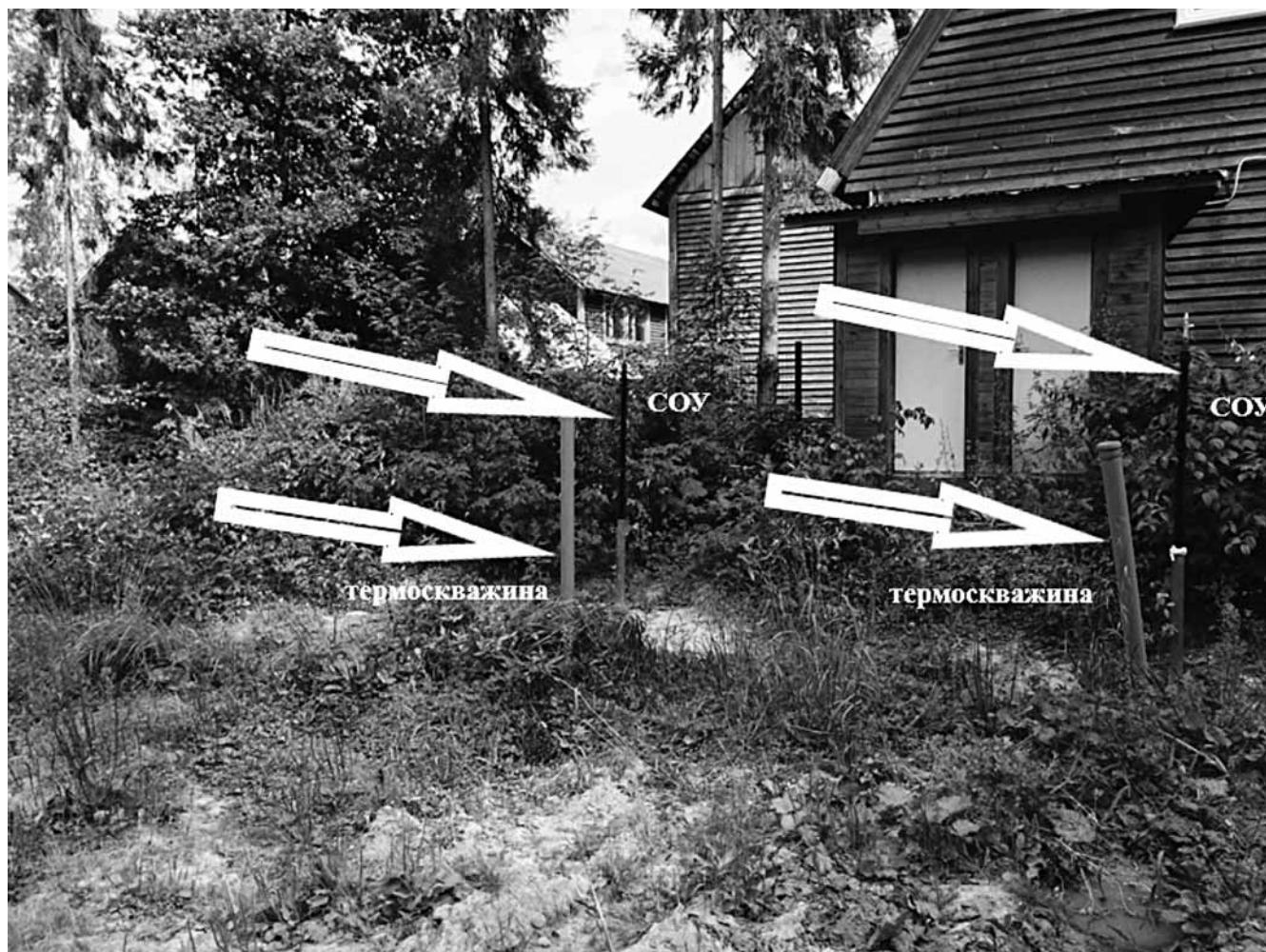


Рис. 8. 10-метровые СОУ вертикального типа естественной циркуляции с температурными скважинами

Заключение. 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 исследуемую территорию в качестве испытательного полигона для проверки специализированного полевого инженерно-геокриологического оборудования.

Работа научно-исследовательского геокриологического полигона на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова позволила провести натурные эксперименты с СОУ. Эта программа направлена на исследование температурных полей около СОУ, изучение эффективности использования различных агентов в качестве теплообменных жидкостей, изучение происходящих

во внутритрубном пространстве фазовых переходов и влияния интенсивности фазовых переходов на работу СОУ по глубине.

Продемонстрирована существенная интенсификация процесса получения первичных данных для дешифрирования криогенных процессов, мерзлотного микрорайонирования и выявления площадей, находящихся в зонах геориска благодаря лидарной съемке.

Верификация данных, полученных по многолетним данным температурного мониторинга в стационарных скважинах на территории Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова, показала полное соответствие с температурными данными, полученными разными методами.

Сопоставление результатов полевых съемочных исследований с применением беспилотных летательных аппаратов с данными маршрутных исследований позволило уточнить карту ландшафтного микрорайонирования района практики. Аэро-фотоматериалы положены в основу многолетнего мониторинга геоморфологической обстановки в районе Звенигородской практики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балобаев В.Т., Девяткин В.Н., Кутасов И.М. Современные геотермические условия существования и развития многолетнемерзлых пород // Докл. 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. Термосвай в строительстве на Севере. Л.: Стройиздат, 1984. 148 с.

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

Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 526 с.

Официальный сайт компании «GeoPrecision». URL: <http://www.geoprecision.com/>

Официальный сайт компании «ONSET». URL: <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers-sensors/temperature>

Официальный сайт компании «InterHeatPipe». URL: http://iheatpipe.ru/history_retro.html

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

Сергеев Д.О., Ухова Ю.А., Станиловская Ю.В., Романовский В.Е. Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах Северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11, № 2. С. 19–26.

СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» Приложение Л. «Определение механических свойств и несущей способности оснований свай в многолетнемерзлых грунтах по результатам статического зондирования». Институт ОАО «НИЦ «Строительство» (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова). М., 2013.

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

СП 11-105-97. Ч. VI. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200037607>

Поступила в редакцию 12.12.2017

Поступила с доработки 30.10.2018

Принята к публикации 31.10.2018