

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.341

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГИСТРИРУЮЩИХ  
УСТРОЙСТВ (ЛОГГЕРОВ) ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА  
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

П.Я. Константинов<sup>1</sup>, А.Н. Федоров<sup>1</sup>, Т. Мачимура<sup>2</sup>, Г. Ивахана<sup>3</sup>,  
Х. Ябуки<sup>4</sup>, Й. Йижима<sup>4</sup>, Ф. Костар<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, [konstantinov@mpi.ysn.ru](mailto:konstantinov@mpi.ysn.ru), [fedorov@mpi.ysn.ru](mailto:fedorov@mpi.ysn.ru)

<sup>2</sup> Университет Осаки, ф-т инженерной экологии,  
2-1, Ямадаока, Суйта, Осака, 565-0871, Япония, [mach@see.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:mach@see.eng.osaka-u.ac.jp)

<sup>3</sup> Университет Хоккайдо, ф-т изучения окружающей среды,  
Кита 10, Ниши 5, Кита-ку, Саппоро, 060-0810, Япония, [go@ees.hokudai.ac.jp](mailto:go@ees.hokudai.ac.jp)

<sup>4</sup> Институт мониторинговых исследований глобального изменения,  
2-15, Натсushima-чо, Йокосука, 237-0061, Япония, [yabuki@jamstec.go.jp](mailto:yabuki@jamstec.go.jp), [yijima@jamstec.go.jp](mailto:yijima@jamstec.go.jp)

<sup>5</sup> Университет Париж-Сюд, лаборатория Взаимодействия и динамики окружающей среды с поверхностью,  
91405, Орси, Франция, [fcostard@geol.u-psud.fr](mailto:fcostard@geol.u-psud.fr)

Рассматриваются вопросы применения автоматических регистраторов температуры (логгеров) для мониторинга теплового состояния верхних горизонтов многолетнемерзлых пород. На основе результатов десятилетних исследований с использованием температурных логгеров в Якутии даются рекомендации по выбору и подготовке логгеров для геокриологического мониторинга, приводятся описание и характеристики отдельных приборов зарубежного производства. Освещен вопрос оборудования буровых скважин и экспериментальных площадок, оснащаемых температурными логгерами. Опробован способ установки логгерных датчиков в герметичный защитный корпус на основе полипропиленовых труб малого диаметра, обеспечивающий защиту датчиков от воздействия грунтовой влаги и сил морозного пучения при многолетнем использовании.

*Температура, многолетнемерзлые породы, грунты, мониторинг, логгеры*

USE OF AUTOMATED RECORDERS (DATA LOGGERS)  
IN PERMAFROST TEMPERATURE MONITORING

P.Ya. Konstantinov<sup>1</sup>, A.N. Fedorov<sup>1</sup>, T. Machimura<sup>2</sup>, G. Iwahana<sup>3</sup>,  
H. Yabuki<sup>4</sup>, Y. Iijima<sup>4</sup>, F. Costard<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,  
677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 36, Russia, [konstantinov@mpi.ysn.ru](mailto:konstantinov@mpi.ysn.ru), [fedorov@mpi.ysn.ru](mailto:fedorov@mpi.ysn.ru)

<sup>2</sup> Osaka University, Department Sustainable Energy and Environmental Engineering,  
2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan, [mach@see.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:mach@see.eng.osaka-u.ac.jp)

<sup>3</sup> Hokkaido University, Faculty of Environmental Earth Science,  
Kita 10, Nishi 5, Kita-ku, Sapporo, 060-0810, Japan, [go@ees.hokudai.ac.jp](mailto:go@ees.hokudai.ac.jp)

<sup>4</sup> Institute of Observational Research for Global Change,  
2-15, Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061, Japan, [yabuki@jamstec.go.jp](mailto:yabuki@jamstec.go.jp), [yijima@jamstec.go.jp](mailto:yijima@jamstec.go.jp)

<sup>5</sup> University Paris-Sud, Laboratory Interactions et Dynamique des Environnements de Surface,  
91405, Orsay, Cedex, France, [fcostard@geol.u-psud.fr](mailto:fcostard@geol.u-psud.fr)

The application of automated temperature recorders (temperature data loggers) in thermal monitoring of upper permafrost is examined. Based on the results of 10 years of use of temperature data loggers in Yakutia, the recommendations are provided on the choice and preparation of data loggers for monitoring studies, and a description is given for selected foreign-made models. The design of drill holes and experimental plots instrumented with temperature data loggers is discussed. A protection method against soil moisture and frost heave during long-term use is proposed. The polypropylene pipes of small diameter are used for protection.

*Temperature, permafrost, ground, monitoring, data loggers*

## ВВЕДЕНИЕ

С начала 90-х гг. XX в. для измерения физических величин (температуры, давления, влажности и др.) в различных средах, в том числе в грунтах, стали широко использоваться логгеры (в иностранной научной литературе: data loggers) – малогабаритные цифровые измерительные устройства для длительной автономной регистрации данных. Благодаря прогрессу производства в области микроэлектроники они вошли в ряд массовых изделий и стали доступными для производственных и научных организаций. Возможность фиксировать и хранить большие массивы данных делает логгеры привлекательными для использования в качестве термоизмерительных средств при геокриологических исследованиях. Если в лабораторных экспериментах можно обойтись статичными средствами термоизмерений, то применение автоматической аппаратуры в полевых исследованиях весьма актуально, так как в современных экономических условиях организация круглогодичных геокриологических стационаров с содержанием исследовательского персонала является трудновыполнимой задачей.

Современные температурные логгеры можно разделить на две основные категории: дорогостоящие прецизионные модели и массовые модели ценовой категории эконом-класса.

Прецизионные логгеры обеспечивают точность измерений не ниже  $\pm 0,1$  °C и имеют несколько каналов измерения, обычно не менее 8–10. Как правило, такие логгеры специально разрабатываются для научных исследований. Примерами подобных изделий иностранного производства, получивших большую популярность в областях метеорологии и контроля окружающей среды, являются многоканальные логгеры серии CR американской фирмы Campbell Scientific Inc., логгеры DATAMARK японской фирмы Nakusan Corporation, термисторы YSI американской компании Yellow Springs Instruments. Стоимость одного такого прибора с комплектом прецизионных термоизмерительных датчиков составляет не менее 2000–2500 дол. В России разработка комплексов высокоточной регистрирующей аппаратуры применительно к геокриологии ведется в отдельных инженерно-исследовательских и научных центрах, таких как ПНИИС, ВСЕГИНГЕО, НИИ космического приборостроения, Фундаментпроект, Институт геофизики СО РАН [Дубровин, 2003; Чернядьев и др., 2003; Казанцев, Дучков, 2006; Попов, Борисенко, 2006]. Эти комплексы обычно комплектуются термодатчиками с длинными кабелями, специально рассчитанными для измерения температуры в буровых скважинах. Некоторые из указанных учреждений практикуют реализацию данных комплексов по предварительным заказам.

Ввиду малой серийности цена на эти изделия довольно высокая. В соответствии с действующим в России нормативом для полевых определений грунтовых температур [ГОСТ 25358-82..., 1982] и стандартом глобальной сети климатического мониторинга GTOS [Permafrost ..., 2009] термоизмерительные средства с уровнем инструментальной погрешности  $\pm 0,1$  °C допустимо применять для измерений температуры на всех глубинах в массиве грунтов. Прецизионные логгеры пригодны для инструментального обеспечения самых разных задач. Кроме собственно мониторинга теплового состояния многолетнемерзлых пород (ММП), они могут использоваться для изучения процессов тепло- и массообмена в грунтах и горных породах в целях решения широкого круга проблем общей и инженерной геокриологии (тепlobалансовых наблюдений, расчетов тепловых потоков и т. д.).

Приборы второй группы (логгеры эконом-класса) обычно одноканальные (за исключением отдельных моделей) и имеют точность измерения в диапазоне  $\pm(0,2-1,0)$  °C. Эти логгеры предназначаются в основном для контроля за температурой среды в производственных помещениях, в местах хранения и транспортировки товаров (склады, рефрижераторы и пр.). В основном такие логгеры производятся за рубежом и продаются по цене от 150 до 300 дол. Логгеры эконом-класса применяют и для решения научных задач, в том числе в геокриологии. В иностранной научной литературе для обозначения таких приборов часто используется термин miniature data loggers. Примерами логгеров эконом-класса, использующихся в геокриологических исследованиях за рубежом, являются логгеры НОВО компании Onset Computer Corporation (США), логгеры UTL фирмы GEOTEST AG (Швейцария), логгеры Tinutag компании Gemini Data Loggers Ltd. (Великобритания), логгеры TR производства T&D Corporation (Япония). Логгеры эконом-класса доступнее для массового использования, так как их стоимость почти на порядок меньше. Однако уровень точности регистраторов данной категории существенно сужает круг решаемых с их помощью задач.

Фактический материал, накопленный в России на геокриологических стационарах к концу 1990-х гг., показывает, что реакция верхних горизонтов ММП на современные изменения климата сильно зависит от ландшафтно-геологических условий [Павлов, 1997, 2001, 2008; Какунов, Павлов, 1997; Скрябин и др., 1999; Васильев, 2004]. Поэтому даже в одном районе, но в разных ландшафтных условиях порой могут наблюдаться противоположные тенденции в изменении температуры ММП. Отсюда следует вывод, что кондиционность мониторинга теплового состояния ММП может быть соблюдена только при охвате наблю-

дениями всего спектра природно-территориальных комплексов (ПТК) исследуемой физико-географической провинции. Это предполагает оборудование не единичных, а десятков наблюдательных точек. Поэтому при решении вопроса инструментального оснащения геокриологического мониторинга, кроме технических характеристик измерительной аппаратуры (точности измерения, диапазона определяемых температур и др.), приходится учитывать экономический фактор, а именно стоимость измерительных средств. Рациональным решением данной проблемы может стать использование как дорогих прецизионных приборов, так и менее дорогих моделей регистрирующей аппаратуры более низкого класса точности. Первые желательны расположить на самых важных ключевых участках мониторинга, а вторые использовать в большем количестве для оборудования основного массива экспериментальных площадок. Такая постановка работ позволяет при одних и тех же затратах обеспечить автономными измерениями максимальное количество точек наблюдения. При этом актуальной задачей является выбор наиболее подходящих образцов среди логгеров ценовой категории эконом-класса, способных обеспечить получение отдельных температурных показателей с приемлемой для геокриологического мониторинга точностью.

Известно, что в многолетнем аспекте между атмосферой и литосферой существует равновесный теплообмен, характеризующийся в течение года равенством прихода и расхода тепла в верхнем слое горных пород. Однако в ряде случаев это равновесие может нарушаться. Причиной могут быть межгодовые вариации отдельных природных факторов (температура воздуха, высота снежного покрова, количество атмосферных осадков и др.), начало длительного цикла климатических изменений или техногенные нарушения поверхностных условий. Это отражается на температуре почв и нижележащих грунтовых горизонтов. Так как ММП расположены в большинстве случаев близко от дневной поверхности, изменения годового баланса прихода–расхода грунтового теплового потока приводят к межгодовой изменчивости средней годовой температуры самого верхнего слоя ММП, лежащего непосредственно под подошвой сезонноталого слоя (СТС). Для краткости изложения среднюю годовую температуру данного слоя обозначим через  $t_{\xi}$ . Экспериментально  $t_{\xi}$  определяется как среднее значение по результатам режимных замеров в течение полного годового периода. В годы с примерным равенством прихода тепла в грунты летом и расхода его зимой, что наблюдается при соответствии метеорологических условий многолетней норме,  $t_{\xi}$  будет близка к своему среднему многолетнему значению. При превышении летнего грунтового теплоприхода

над зимним теплорасходом  $t_{\xi}$  будет выше средней многолетней величины. В естественных ландшафтах такая картина обычно наблюдается в годы с многоснежными зимами или в начале многолетнего климатического цикла потепления. В зонах техногенных нарушений земной поверхности это может происходить в результате резкого увеличения летнего теплоприхода в грунты, например, при удалении растительного и напочвенного покровов. При превышении зимнего оттока тепла из грунтов над летним приходом происходит понижение  $t_{\xi}$  относительно своего среднего многолетнего значения. В естественных условиях это характерно для годовых периодов с малоснежными зимами или в начале многолетнего климатического цикла похолодания. На участках освоения это может произойти, например, при уплотнении или удалении снежного покрова.

Таким образом, ежегодные определения  $t_{\xi}$  позволяют качественно отслеживать многолетнюю изменчивость годового теплового баланса слоя годовых теплооборотов. Это дает возможность выявить направленность развития теплового состояния грунтов уже в первые годы с момента изменения поверхностных условий. В естественных ландшафтах становится возможным более наглядно и достоверно оценить влияние современных климатических изменений на ММП, а на участках освоения – воздействие тех или иных техногенных нарушений. По результатам ежегодных измерений  $t_{\xi}$  можно заблаговременно выявить неблагоприятные тенденции в развитии теплового состояния грунтовых оснований и принять необходимые технологические решения (мероприятия по искусственному охлаждению грунтов и т. д.). Важность контроля за многолетней динамикой температуры приповерхностных горизонтов ММП в вопросе изучения влияния климатических изменений на эволюцию криолитозоны отмечается российскими и зарубежными исследователями [Smith, Riseborough, 1996].

Для определения  $t_{\xi}$  требуется проведение годичного цикла наблюдений. При использовании статичных средств измерения для этого нужны, как минимум, ежемесячные замеры в течение полного года, что предполагает затраты на работу наблюдателей, а при удаленности участка работ вызывает существенные транспортные и прочие расходы. Использование логгеров в решении данной задачи позволяет добиться заметной экономии средств – достаточно только один раз в год провести работы по съему данных и замене источников питания. Увеличение периодичности опроса температурных датчиков при автоматических измерениях существенно повышает достоверность получаемых результатов [Цибульский, 1985]. В первую очередь это справедливо по отношению к средним значениям температуры измеряемых

сред за определенные временные интервалы (сутки, декада, месяц, год), так как уменьшается влияние случайных ошибок большой амплитуды и имеет место взаимная компенсация отклонений противоположной направленности. Современные логгеры обладают большим объемом памяти, что позволяет вычислять средние значения суточных, декадных, месячных и годовых температур соответственно по результатам десятков, сотен и тысяч отдельных измерений. Поэтому для определения средних температур, особенно за длительные периоды (месяц и год), необязательно использовать прецизионные модели логгеров. Для решения данной задачи вполне допустима точность регистрирующих приборов на уровне  $\pm(0,2-0,3)^\circ\text{C}$ , что обеспечивается многими моделями логгеров эконом-класса.

В соответствии с российским стандартом для полевых определений грунтовых температур [ГОСТ 25358-82..., 1982] термоизмерительные средства с уровнем инструментальной погрешности  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  допустимо применять для измерений температуры грунтов, которая изменяется в течение всего периода наблюдений в диапазоне величин, превышающем  $3^\circ\text{C}$ . Этому требованию удовлетворяет только верхняя часть слоя годовых теплооборотов, примерно до глубин 4–5 м, поэтому располагать температурные датчики логгеров эконом-класса на более глубоких уровнях нельзя из-за чисто технических ограничений. При использовании таких логгеров наиболее правильно применять совмещенный способ измерения температуры грунтов. Для наблюдений за температурой грунтов в нижних горизонтах слоя годовых теплооборотов, в том числе для определения температуры на его подошве, следует использовать статические измерительные средства (терморезисторы, металлические термометры сопротивления, термодпары), отградуированные для замеров вручную с точностью не ниже  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ .

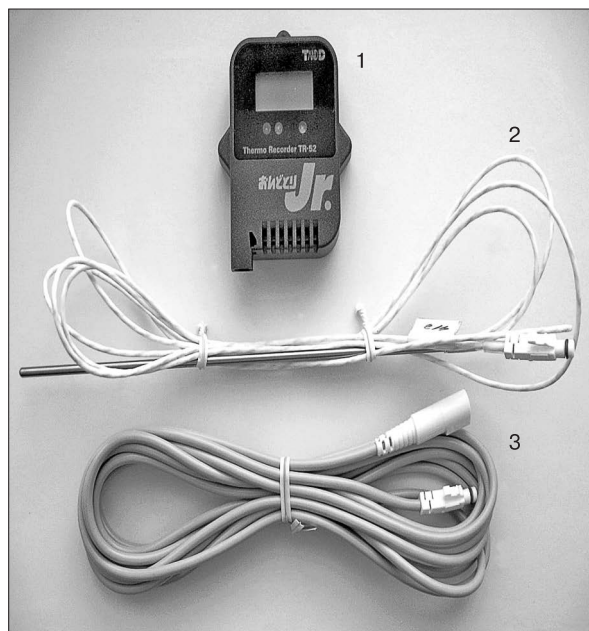
Резюмируя вышеизложенное, можно высказать следующие соображения. Кондиционность температурного мониторинга ММП может быть обеспечена только организацией большого числа мониторинговых площадок с охватом всего спектра ПТК. Установить на всех наблюдательных участках дорогостоящую прецизионную аппаратуру не всегда осуществимо по экономическим причинам. Поэтому при наличии у исследователей ограниченного количества высокоточных логгеров, последние лучше использовать только на самых важных ключевых участках, выбранных в качестве опорных в пределах исследуемого района. Во всех прочих ландшафтных комплексах рационально применять менее дорогие логгеры эконом-класса. Наилучшие результаты при использовании таких приборов можно получить при определении

средних значений температуры грунтов за длительные временные интервалы (месяц, год), поэтому их следует применять в основном для отслеживания многолетней динамики  $t_g$ . При этом площадки, оборудованные логгерами эконом-класса, обязательно следует дополнить скважинами для статических измерительных средств с точностью измерения не ниже  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  для контроля за многолетними изменениями температуры нижних горизонтов слоя годовых теплооборотов.

При отборе логгеров для геокриологических исследований необходимо обратить внимание на такую характеристику, как допустимый температурный диапазон работы прибора, чтобы обеспечить его бесперебойную работу в зимнее время в условиях крайне низких температур воздуха. Для размещения логгеров в местах, где не созданы условия искусственного подогрева, следует выбирать модели с нижним пределом рабочего диапазона температур не выше  $-20^\circ\text{C}$ . Этого вполне достаточно, если зимой прибор будет находиться под снежным покровом.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

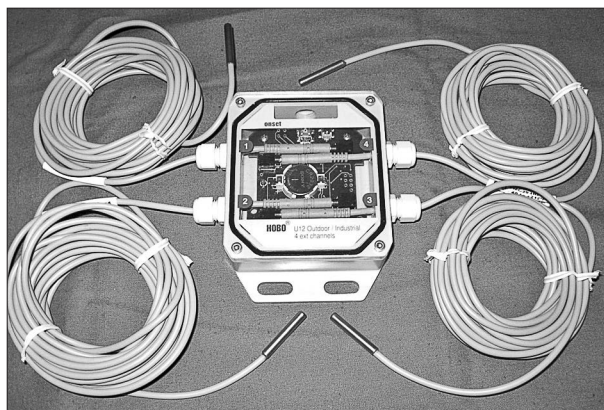
Институтом мерзлотоведения СО РАН в рамках совместных научных проектов с Университетом Хоккайдо (Япония), Институтом изучения глобальных изменений (Япония) и Университетом Париж-Сюд (Франция) при проведении мо-



**Рис. 1. Одноканальный температурный логгер TR-52 производства T&D Corporation (Япония).**

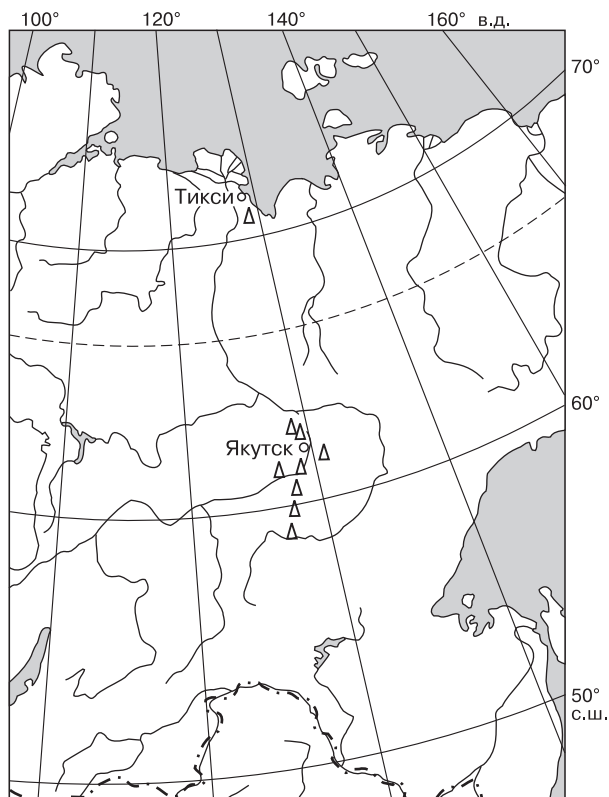
1 – логгер TR-52; 2 – датчик температуры TR-5220 (длина кабеля 2 м); 3 – удлинительный кабель TR-2C30 (длина 3 м).





**Рис. 2. Четырехканальный температурный логгер NOVO U12-008 производства Onset Computer Corporation (США) с датчиками ТМС20-НД (длина кабеля 6,1 м).**

нитинговых исследований термического режима многолетнемерзлых грунтов более 10 лет успешно используются две модели логгеров эконом-класса: одноканальный температурный логгер TR-52 японской фирмы T&D Corporation (рис. 1) и четырехканальный температурный логгер NOVO U12-008 американской компании Onset Computer Corporation (рис. 2). Всего оборудовано около 50 экспериментальных площадок для мониторинга  $t_{\xi}$  и температуры поверхности почвы с использованием указанных моделей логгеров в различных ландшафтах на территории Якутии (рис. 3). Основные технические характеристики приборов приведены в таблице. В России поставки данных моделей логгеров потребителям производят ЗАО «Перел Раша» (С.-Петербург, <http://www.perel-russia.ru>) и компания «МегаТестер» (С.-Петербург, <http://www.megatester.ru>).



**Рис. 3. Схема размещения мониторинговых полигонов, оборудованных площадками с температурными логгерами.**

Длительный опыт применения указанных логгеров позволяет выделить их эксплуатационные преимущества. Основным положительным свойством логгера TR-52 является широкий рабочий диапазон измеряемых температур, в том числе в зоне отрицательных температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ). Это

**Основные технические характеристики температурных логгеров**

| Характеристика  | TR-52   | NOVO U12-008  |
|---|---|---|
| Количество каналов измерения  | 1   | 4   |
| Максимальное количество регистрируемых значений температуры                   | 16 000  | 43 000*   |
| Рабочий диапазон измеряемых температур, $^{\circ}\text{C}$                    | $-60...+155$  | $-40...+100$  |
| Возможные интервалы записи данных   | 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 с,<br>1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60 мин | 1, 2, 3, ..., 59 с, 1, 2, 3, ...,<br>59 мин, 1, 2, 3, ..., 18 ч |
| Разрешающая способность, $^{\circ}\text{C}$                                   | 0,1   | 0,1   |
| Точность измерения температуры, заявленная производителем, $^{\circ}\text{C}$ | $\pm(0,25-0,35)$  | $\pm 0,25$  |
| Рабочий температурный диапазон прибора, $^{\circ}\text{C}$                    | $-40...+80$   | $-20...+80$   |
| Длина кабелей температурных датчиков, м                                       | 0,6; 2**  | 0,3; 1,8; 6,1; 15,2   |
| Водозащищенность  | Не защищен  | Не защищен  |
| Влагозащищенность   | Защищен   | Защищен   |

\* Суммарно на все каналы.

\*\* Возможно подсоединение удлинительного кабеля длиной 3 м.

позволяет использовать его для измерения не только температуры грунтов, но и воздуха в любой точке криолитозоны. Нижний предел рабочего температурного диапазона данного прибора составляет  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому логгер практически не требует утепления в зимнее время. Для большинства других моделей температурных логгеров этот показатель составляет  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что предполагает принятие мер по теплоизоляции, например, размещение логгера под снежным покровом. Логгер TR-52 можно использовать в местах отсутствия снежного покрова, например, в проветриваемых подпольях под сооружениями на свайных фундаментах. К недостаткам данного прибора можно отнести относительно высокую стоимость в сравнении с прочими моделями логгеров эконом-класса.

Важными достоинствами логгера НОВО U12-008 можно считать наличие четырех каналов измерения, широкий диапазон длины кабелей температурных датчиков (0,3, 1,8, 6,1 и 15,2 м), достаточно высокую точность измерений температуры для регистраторов данного класса. Комплектные к этой модели логгера датчики ТМС-НД разных партий имеют небольшой разброс характеристик. Перед установкой на мониторинговых участках все логгеры проверялись на точность в термостате по откалиброванному платиновому термометру сопротивления. За редким исключением ошибка не выходила за пределы  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Логгер НОВО U12-008 имеет относительно невысокую стоимость, сравнимую с ценами на одноканальные модели. Например, цена одного логгера (без температурных датчиков) в ЗАО “Перел Раша” на декабрь 2009 г. составляла 9890 руб.

Для оценки точности определения средней годовой температуры приповерхностных горизонтов ММП при использовании логгеров TR-52 и НОВО U12-008 в течение нескольких лет на ряде экспериментальных участков около Якутска было проведено сравнение с данными, полученными при помощи терморезисторов ММТ-1, отградуированных на уровне ошибки измерения  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Датчики логгеров и терморезисторы были заморожены в грунты на одинаковых глубинах (3,2 м) в непосредственной близости друг от друга. Замеры температуры терморезисторами проводились с периодичностью 2–3 раза в месяц в течение полного года, а частота опроса логгеров задавалась на ежечасную запись данных. Расчеты  $t_{\Sigma}$  по данным измерений терморезисторами и логгерами оказались практически идентичными.

Необходимо отметить опыт других научных организаций по применению логгеров эконом-класса для измерения температуры грунтов. Так, ранее логгер НОВО U12-008 был успешно апробирован на Аляске и рекомендован для температурного мониторинга грунтов в криолитозоне орг-

комитетом международной научной программы “Thermal State of Permafrost” (TSP), действующей в рамках всемирных климатических проектов GCOS/GTOS и под эгидой Международной ассоциации по мерзлотоведению [Manual..., 2008]. В России кроме территории Якутии этот прибор в последнее время внедряется для оборудования сети геокриологического мониторинга по проекту TSP на севере европейской части России, в Западной, Средней и Южной Сибири. Несколькими российскими научными организациями (участниками программы TSP) на территории Европейского Севера и Западной Сибири были проведены специальные работы для выяснения точности измерения температуры грунтов логгерами НОВО U12-008 [Oberman, 2008; Romanovsky et al., 2008]. Датчики логгеров опускались в буровые скважины вместе с контрольными ртутными термометрами и отградуированными термисторами. Авторами отмечается, что точность измерений температуры логгерами данной модели оказалась на уровне  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако из этих публикаций не ясно, проводились ли контрольные измерения в зимние месяцы. Это очень важно, так как известно, что при низких температурах точность регистрирующей аппаратуры снижается. Миниатюрные логгеры UTL фирмы GEOTEST AG (Швейцария) на протяжении длительного ряда лет используются для измерений температуры поверхности и неглубоких грунтовых горизонтов при проведении мониторинга в горной криолитозоне на территории Швейцарии. Исследователями отмечается высокая достоверность данных, полученных при помощи этих приборов [Krummenacher, 1997; Hoelzle et al., 1999, 2003].

Таким образом, положительный опыт использования логгеров эконом-класса в разных научных центрах позволяет заключить, что эти относительно недорогие приборы вполне пригодны для оборудования сети геокриологического мониторинга. Наиболее надежные результаты при их использовании могут быть получены для определения средних значений температур приповерхностных грунтовых горизонтов за длительные временные интервалы (месяц, год). Из конкретных моделей можно рекомендовать логгер НОВО U12-008, который по комплексу показателей (точность измерений, количество каналов измерения, длина кабелей термодатчиков, цена) среди логгеров ценовой категории эконом-класса является оптимальным для автоматических измерений температуры верхних горизонтов ММП.

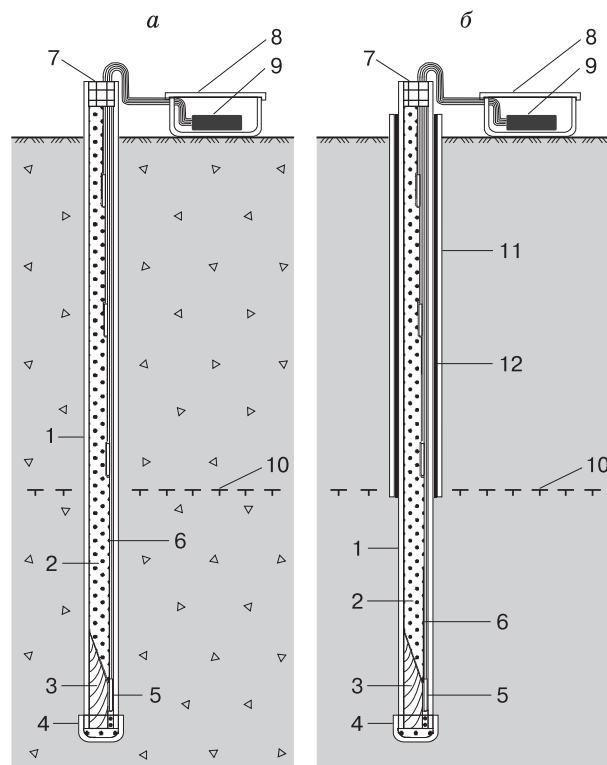
Фирмы-изготовители не снабжают температурные датчики к логгерам эконом-класса градуировочными паспортами, поэтому перед использованием необходимо сверить их с контрольным термометром. Логгерные датчики также можно проверить по реперной температурной точке тая-

ния льда ( $0^{\circ}\text{C}$ ), поместив их в термостатирующий сосуд со смесью воды и льда, где лед преобладает по объему. Использование дистиллированной воды для приготовления всех компонентов смеси позволяет воспроизвести искомую температуру с точностью  $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ . После окончания времени выстойки датчики подключаются к логгеру для контрольной записи температуры, по результатам которой определяются необходимые поправки.

Кондиционность температурного мониторинга грунтов и работоспособность логгерных устройств при многолетнем использовании зависит не только от приборной базы, но и от соблюдения определенных правил установки температурных датчиков в грунтах. Их игнорирование может привести к тому, что даже самая совершенная аппаратура окажется бесполезной. Специальные исследования, проведенные ранее в различных регионах криолитозоны, показали, что вследствие конвективных процессов в стволах буровых скважин, находящихся в воздушно-сухом состоянии или заполненных незамерзающими жидкостями, измерения температуры грунтов в них характеризуются существенными погрешностями вплоть до глубин 5–10 м от земной поверхности [Девяткин, 1972, 1993; Девяткин, Кутасов, 1973; Павлов, 1975, 2006; Кутасов, 1976]. Поэтому оборудование логгерных датчиков в верхней части слоя годовых теплооборотов должно осуществляться методом засыпки всего ствола скважины грунтом после их установки. При этом обсадные трубы желательно не оставлять. Если измерения в глубоких горизонтах (более 10 м) предполагается производить переносными термокосами на основе статичных измерителей (терморезисторов и др.), тогда основную термометрическую скважину можно оставить в воздушно-сухом состоянии или заполнить незамерзающей жидкостью, а рядом с ней пробурить короткую скважину для постоянной установки логгерных датчиков с последующей обязательной засыпкой их грунтом. Расстояние между скважинами должно быть не менее 3–4 м, чтобы тепловые возмущения, возникающие вокруг приустьевой части незасыпанной скважины из-за конвективного теплопереноса, не повлияли на измерения температуры датчиками логгера.

Геокриологический мониторинг планируется, как правило, на длительный период, охватывающий десять лет и более. Поэтому при установке логгерных датчиков в грунты необходимо обеспечить условия для их многолетней работоспособности. Основными причинами досрочного отказа датчиков является воздействие грунтовой влаги и сил морозного пучения. Температурные датчики логгеров изготавливаются в большинстве случаев на основе терморезисторов, которые из всех типов термоизмерительных элементов наиболее чувствительны к негативному воздействию грунтовой

влаги. При производстве датчиков используются провода, составленные только из медных жил. Они обладают слабой прочностью на разрыв и могут быть повреждены от напряжений, создаваемых касательными силами морозного пучения в период промерзания СТС. Гарантированным способом защиты проводных датчиков одновременно от воздействия грунтовой влаги и морозного пучения является применение герметичных защитных трубок на всю длину проводного датчика (связки датчиков) (рис. 4) [Константинов, 2009]. Для этой цели лучше использовать стандартные полипропиленовые трубы малого диаметра, применяемые для обустройства внутренних водопроводов в зданиях. Сделанные на их основе защитные трубки обладают высокой механической прочностью, устойчивостью к многократным циклам охлаждения–нагрева и водостойкостью, поэтому они будут одновременно защищать датчики от воздействия сил пучения и от грунтовой влаги. Для установки логгерных датчиков наиболее подходят трубы с внешним диаметром 20 и 25 мм и комплектные к ним полипропиленовые заглушки.



**Рис. 4. Устройство трубчатого защитного корпуса для датчиков температурного логгера:**

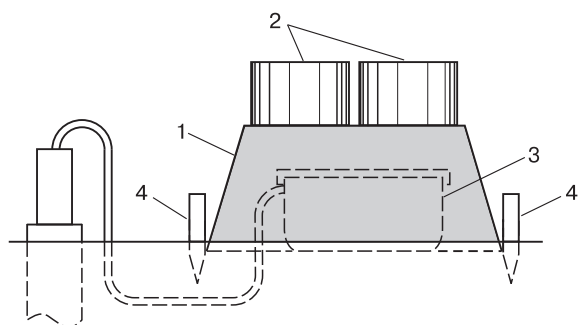
а – для слабопучинистых почвогрунтов; б – для сильнопучинистых почвогрунтов; 1 – полипропиленовая трубка; 2 – песок; 3 – деревянный клин; 4 – заглушка; 5 – датчик логгера; 6 – кабель; 7 – герметик; 8 – защитная коробка; 9 – логгер; 10 – подошва СТС; 11 – противопучинная трубка; 12 – консистентная смазка.

Для обеспечения водостойкости соединения заглушки должны прикрепляться к трубкам методом термического разогрева при помощи специального аппарата для стыковки полипропиленовых труб. Для предотвращения конвекции воздуха все внутреннее пространство защитной трубки после установки в ней проводного датчика (связки датчиков) необходимо засыпать сухим песком. Самую верхнюю часть трубки в месте выхода наружу кабеля (связки кабелей) в целях гидроизоляции можно залить силиконовым автогерметиком. В сильнопучинистых почвогрунтах неглубоко установленные термоизмерительные комплекты могут ежегодно подвергаться постепенному перемещению (выпучиванию) вверх, что будет сопровождаться изменением первоначального уровня положения датчиков. В верхних грунтовых горизонтах сдвиг температурных датчиков по вертикали даже на первые сантиметры может привести к существенным ошибкам при обработке и интерпретации данных температурных измерений. Для исключения многолетнего выпучивания измерительного комплекта защитную трубку в сильнопучинистых почвогрунтах необходимо отделить от прямого контакта с сезоннопротаивающим грунтом внешней противопучинной трубкой (см. рис. 4, б). Между ними должен быть некоторый зазор, который на всю длину противопучинной трубки заполняется консистентной смазкой (литолом, солидолом), препятствующей возможному смерзанию трубок. После спуска трубчатого комплекта в скважину все свободное пространство ее ствола должно быть плотно заполнено грунтом. Датчики логгера для определения  $t_{\xi}$  лучше располагать на 0,5–1,0 м ниже максимальной глубины протаивания в пределах экспериментальной площадки. Для лучшего сопоставления с данными метеостанций их можно расположить на уровнях, соответствующих стандартным глубинам измерения температуры почвогрунтов в сети Росгидромета. В зависимости от мощности СТС в районе

исследований можно выбрать следующие глубины: 1,0, 1,2, 1,6, 2,4 и 3,2 м. В случае использования многоканальных логгеров остальные датчики можно установить в пределах СТС и на поверхности почвы (напочвенного покрова).

Перед установкой на экспериментальных площадках логгеры лучше помещать в защитные коробки для изоляции от внешних воздействий. Для этой цели вполне подходят пластиковые контейнеры, предназначенные для хранения пищевых продуктов. Большинство моделей логгеров имеет нижний предел рабочего диапазона температур не более  $-20^{\circ}\text{C}$ , поэтому в зимнее время они должны находиться под снежным покровом. При этом необходимо принять меры для предотвращения возможного подтопления прибора. Для размещения логгеров нельзя делать закопашки, так как они становятся коллекторами талых и дождевых вод. На возвышенных дренированных участках защитные коробки с приборами можно устанавливать непосредственно на поверхности почвы (напочвенного покрова). В ложбинах и котловинах, у подножий склонов и на прочих низких местоположениях, где возможны сезонные скопления поверхностных вод, они должны устанавливаться выше основной уровневой поверхности. Для этого следует использовать небольшие искусственные грунтовые подсыпки или природные возвышения микро- и нанорельефа (верхушки бугристых полигонов, кочки и т. д.).

Для размещения логгеров на временно затопляемых участках с высокими уровнями подтопления можно рекомендовать следующий способ водозащиты прибора. Защитная коробка, в которой размещен логгер, сверху накрывается перевернутой вверх дном пластиковой коробкой большего размера без трещин и отверстий. На нее сверху укладываются металлические пригрузы, закрепляемые при помощи ленты-скотча. Суммарный вес пригрузов должен превышать вес объема воды, вмещаемого во внешнюю коробку. Для предотвращения возможного горизонтального сдвига вокруг внешней коробки с четырех сторон устанавливаются ограничительные кольшки. Кабель (связка кабелей) термодатчиков путем заглубления под поверхность почвы выводится внутрь внешней коробки (рис. 5). При оборудовании температурных логгеров в местах, где возможно движение транспорта (например, дорожных насыпей), возникают определенные трудности, связанные с проблемой их сохранности. Наиболее удобны при этом модели логгеров, комплектуемые длинными проводными датчиками, как НОВО U12-008. Это позволяет установить датчики на заданной глубине в осевой части насыпи, а концы проводов и сам логгер вывести за пределы проезжей части. Для лучшей сохранности боковые проводные ответвления



**Рис. 5. Устройство водозащитного укрытия логгера для временно затопляемых участков:**

1 – внешняя коробка; 2 – пригрузы; 3 – защитная коробка с логгером; 4 – ограничительные кольшки.



следует помещать на некоторой глубине от поверхности внутри металлических или полимерных труб. На неохраняемых участках следует предусмотреть меры для защиты логгеров от доступа посторонних лиц. Наиболее надежны в этом случае маскировочные мероприятия, т. е. сплошная обваловка выхода защитной трубки, кабеля и коробки с логгером дерном, мхом, глыбово-щебнистым материалом.

Величина  $t_{\xi}$  в геокриологии определяется не по календарному году, а по годовому периоду, за начало которого принимается средняя многолетняя дата начала периода зимнего промерзания или летнего оттаивания [Павлов, 1965]. Так как до начала периода оттаивания земная поверхность еще покрыта снегом, установку логгеров следует производить перед началом зимнего сезона. Запуск логгеров на начало годичного цикла измерений следует ориентировать на среднюю многолетнюю дату начала зимнего промерзания грунтов в исследуемом районе. Для большей части криолитозоны за такую дату можно принять 1 октября. В соответствии с этим в последующие годы надо планировать работы по съему данных и замене батарей, чтобы получить данные за полный годовой период. Установку логгерных датчиков в грунты необходимо произвести заранее, чтобы к началу измерений завершилась выстойка буровых скважин. Для определения  $t_{\xi}$  наиболее эффективно настроить логгеры на ежечасную запись показаний температуры. Этого вполне достаточно для гарантированной работы логгера в течение полного годового периода и получения массива достоверных данных. При организации мониторинговых площадок в труднодоступной местности логгеры можно программировать на больший интервал записи (через 4–6 ч), если это предусматривает конструкция прибора (как, например, логгера НОВО U12-008). Это позволит продлить период автономной работы логгера без замены источника питания до двух лет.

## ВЫВОДЫ

1. Прецизионные регистраторы температуры отечественного и иностранного производства позволяют осуществлять автоматические измерения на любых глубинных уровнях грунтового массива. Обладая точностью измерения не ниже  $\pm 0,1$  °С, они обеспечивают наилучшие результаты при проведении геокриологического мониторинга и пригодны для решения самого широкого круга задач геокриологических исследований. Однако высокая стоимость таких устройств сдерживает их массовое применение. Прецизионные температурные

логгеры рационально использовать на важных ключевых участках, выбранных в качестве опорных в пределах изучаемого района.

2. Исследования, проведенные в течение 10 лет с использованием логгеров эконом-класса, а также опыт их применения в других отечественных и зарубежных научных центрах позволяют считать, что эти относительно недорогие приборы вполне пригодны для геокриологического мониторинга и прикладных инженерно-геокриологических исследований. Для этих целей следует отбирать модели с точностью измерения не ниже  $\pm(0,2-0,3)$  °С\*. С помощью данных приборов допустимо проводить измерения температуры только в верхней части слоя годовых теплооборотов, поэтому экспериментальные площадки следует обязательно дополнить скважинами для статичных измерительных средств (терморезисторов, металлических термометров сопротивления, термопар) с уровнем точности  $\pm 0,1$  °С для контроля за многолетними изменениями температуры глубоких грунтовых горизонтов. Наилучшие результаты при использовании логгеров эконом-класса можно получить при определении средних значений температуры грунтов за длительные временные интервалы (месяц, год). В целях геокриологического мониторинга их лучше применять для ежегодных измерений средней годовой температуры приповерхностных горизонтов ММП. Среди регистраторов данной ценовой категории примером оптимальной по комплексу показателей (точность измерений, количество каналов измерения, длина кабелей термодатчиков, цена) модели является температурный логгер НОВО U12-008 производства американской компании Onset Computer Corporation, успешно опробованный зарубежными и российскими научно-исследовательскими учреждениями в разных регионах криолитозоны.

3. Логгерные датчики в верхней части слоя годовых теплооборотов должны устанавливаться в буровые скважины только методом их последующей засыпки грунтом. При этом обсадные трубы желательнее не оставлять. Если измерения в глубоких горизонтах (более 10 м) предполагается производить переносными термодатчиками на основе статичных измерителей (терморезисторов и др.), тогда основная термометрическая скважина может быть оставлена в воздушно-сухом состоянии или заполнена незамерзающей жидкостью, а рядом с ней (не ближе 3 м) следует пробурить короткую скважину для постоянной установки логгерных датчиков с обязательным заполнением ствола грунтом по окончании установки проводного комплекта.

\* Редколлегия журнала "Криосфера Земли" не разделяет эту точку зрения и считает, что измерения температуры грунтов следует проводить с точностью  $\pm 0,1$  °С.

4. Опробован способ установки логгерных датчиков в герметичный защитный корпус на основе полипропиленовых труб малого диаметра, обеспечивающий надежную защиту от воздействия грунтовой влаги и сил морозного пучения при многолетнем использовании.

5. В сильнопучинистых грунтах для сохранения первоначального уровня положения термодатчиков короткие термоизмерительные комплекты рекомендуется оснащать противопучинными трубками.

## Литература

**Васильев А.А.** Динамика морских берегов в криолитозоне Западного сектора Российской Арктики (на примере Карского моря): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2004, 49 с.

**ГОСТ 25358-82.** Грунты. Метод полевого определения температуры. М., Стройиздат, 1982, 16 с.

**Девяткин В.Н.** Влияние естественной конвекции на температуру в вертикальных скважинах // Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. М., Наука, 1972, с. 127–142.

**Девяткин В.Н.** Тепловой поток криолитозоны Сибири (методика и результаты изучения). Новосибирск, Наука, 1993, 165 с.

**Девяткин В.Н., Кутасов И.М.** Влияние свободной тепловой конвекции и обсадных труб на температурное поле в скважинах // Тепловые потоки из коры и верхней мантии. М., Наука, 1973, № 12, с. 99–106.

**Дубровин В.А.** Система геоэкологического обеспечения объектов недропользования осваиваемых арктических регионов криолитозоны // Разведка и охрана недр, 2003, № 7, с. 15–20.

**Казанцев С.А., Дучков А.Д.** Высокоточный мониторинг температуры при решении геологических и геоэкологических задач: аппаратура и опыт применения // ГЕО-Сибирь–2006. Т. 3. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия: Материалы Междунар. науч. конгресса (24–28 апр. 2006 г.). Новосибирск, СГГА, 2006, ч. 2, с. 25–29.

**Какунов Н.Б., Павлов А.В.** Оценка и прогноз термического режима криогенных почв на севере России в связи с ожидаемым потеплением климата // Криопедология-97: II Междунар. конф. Сыктывкар, 1997, с. 121.

**Константинов П.Я.** Методика оборудования наблюдательных площадок для температурного мониторинга многолетнемерзлых грунтов (науч.-справ. пособие). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2009, 68 с.

**Кутасов И.М.** Термическая характеристика скважин в районах многолетнемерзлых пород. М., Недра, 1976, 120 с.

**Павлов А.В.** Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., Изд-во АН СССР, 1965, 254 с.

**Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Кн. изд-во, 1975, 302 с.

**Павлов А.В.** Прогноз эволюции криолитозоны на севере Западной Сибири (по данным мониторинга) // Итоги фундаментальных исследований криолитозоны Земли в Аркти-

ке и Субарктике: Материалы Междунар. конф. (Пущино, 1996 г.). Новосибирск, Наука, 1997, с. 94–102.

**Павлов А.В.** Реакция криолитозоны на современные и ожидаемые в XXI веке климатические изменения // Разведка и охрана недр, 2001, № 5, с. 8–14.

**Павлов А.В.** Оценка погрешностей измерений температуры грунтов в неглубоких скважинах в условиях сплошной криолитозоны // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 9–13.

**Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Академ. изд-во “Гео”, 2008, 229 с.

**Попов Ю.А., Борисенко К.Ю.** Информационно-регистрационная система для полевого измерения температуры грунтов // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения: Материалы Междунар. конф. Тюмень, ТюмГНГУ, 2006, т. 2, с. 52–55.

**Скрябин П.Н., Скачков Ю.Б., Варламов С.П.** Потепление климата и изменение термического состояния грунтов в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 32–40.

**Цибульский В.Р.** Автоматизация геоэкологических исследований. Новосибирск, Наука, 1985, 145 с.

**Чернядьев В.П., Попов Ю.А., Елизаров Н.Г.** Термометрическая аппаратура для инженерно-геологических изысканий и мониторинга // Пром. и гражд. стр-во, 2003, № 10, с. 27–28.

**Hoelzle M., Wegmann M., Krummenacher B.** Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: First experience from the Swiss Alps // Permafrost and Periglacial Processes, 1999, vol. 10, No. 2, p. 113–124.

**Hoelzle M., Haeberli W., Stocker-Mittaz C.** Miniature ground temperature data logger measurements 2000–2002 in the Murtel-Corvatsch area, Eastern Swiss Alps // Proc. of the Eighth Intern. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, 2003, p. 419–424.

**Krummenacher B.** Minitemperatur-Datenlogger UTL1 // Arbeitsheft der VAW/ETH, Zurich, 1997, No. 19, p. 10–13.

**Manual for Monitoring and Reporting Permafrost Measurements. Pt 1: Permafrost borehole temperatures. Thermal State of Permafrost (TSP), Intern. Permafrost Assoc., 2008.** ([http://www.gi.alaska.edu/snowice/Permafrost-lab/literature/TSP\\_manual.pdf](http://www.gi.alaska.edu/snowice/Permafrost-lab/literature/TSP_manual.pdf)).

**Oberman N.** Contemporary permafrost degradation of the European north of Russia // Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, USA, Univ. of Alaska, 2008, p. 1305–1315.

**Permafrost and seasonally frozen ground. T. 7. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 62, Global Terrest. Observ. System, Rome, 2009.** (<http://www.fao.org/gtos>).

**Romanovsky V.E., Kholodov A.L., Marchenko S.S. et al.** Thermal State and Fate of Permafrost in Russia: First Results of IPY // Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, USA, Univ. of Alaska, 2008, p. 1511–1518.

**Smith M.W., Riseborough D.W.** Ground temperature monitoring and detection of climate change // Permafrost and Periglacial Processes, 1996, vol. 7, No. 4, p. 301–310.

*Поступила в редакцию  
9 марта 2010 г.*