

УДК 550.361.4

© В. В. Гравиров, К. В. Кислов, Д. В. Лиходеев, А. Н. Котов

АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА

Для изучения влияния мощности мерзлого слоя грунта на сейсмический сигнал был разработан электронный мерзлотомер. В то время как влияние температуры грунтов на скорость распространения сейсмических волн исследовано довольно полно, неосвещенным остается вопрос затухания сейсмических волн в зависимости от различной глубины промерзания грунта. Недостаточно исследованы и электрические свойства мерзлых грунтов. Этот прибор позволяет осуществлять мониторинг среднего состояния значительных территорий или выявлять локальные особенности местности. Измерения осуществляются в автоматическом режиме без нарушения естественных условий на местности.

Кл. сл.: мерзлотомер, температура грунта, глубина промерзания, автоматизация наблюдений, сейсморазведка, мониторинг

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг мощности мерзлого слоя грунта необходим для многих научных и прикладных задач. Глубина промерзания грунта оказывает влияние на точность сейсмоакустических методов в горном деле, сейсмоакустическом каротаже, при инженерно-геологических изысканиях для изучения геологического строения массива, нарушений угольных пластов, для оценки напряженного состояния геологической среды при малоглубинной томографии.

С научной точки зрения представляют интерес такие вопросы, как распространение сейсмических и звуковых волн в приповерхностном слое, электрические свойства мерзлых грунтов разной толщины и др. Этот вопрос имеет актуальное и немаловажное значение для сейсморазведки и малоглубинной геофизики в целом, при определении разрешающей способности сейсмостанций, изучении сейсмических шумов и может быть полезен при сейсмическом микрорайонировании территорий с мерзлыми грунтами [1, 2]. Результаты мониторинга можно использовать при обработке данных структурной сейсморазведки на этапе введения различных поправок (в том числе динамических) на неоднородность строения верхней части геологической среды [3]. Нахождение зависимостей параметров среды от глубины промерзания позволит, например, следить за деградацией вечной мерзлоты в условиях глобального потепления, выделять природные и техногенные талики, осуществлять прогнозы активизации криогенных процессов (растрескивание, солифлюкция, криогенное оползание) и других мерзлотных явлений.

Среди прикладных задач мониторинг необходим для обеспечения проведения работ на слабых, рыхлых, болотистых грунтах для определения возможной нагрузки, при эксплуатации дорог, малозаглубленных инженерных сетей, трубопроводов и др. [4]

Наиболее близкие задачи обычно решают с помощью двух приборов — мерзлотомеров Ратомского и Данилина [5]. Они предназначены для определения глубины сезонного промерзания грунта и глубины проникания в грунт нулевой температуры. По их показаниям назначают глубины заложения и выбирают типы фундаментов зданий и сооружений, разрабатывают мероприятия, исключающие возможность появления недопустимых деформаций оснований и фундаментов, назначают глубины заложения трубопроводов (водопровода, канализации и т. п.) и разрабатывают их конструктивные решения, удовлетворяющие требованиям морозоустойчивости. Также они служат для разработки конструктивных решений и мероприятий, исключающих возможность появления недопустимых деформаций земляного полотна и покрытия автомобильных дорог. То есть их задача — определить наибольшую глубину промерзания грунта в данной местности. Совершенно ясно, что эти приборы не могут служить для мониторинга мощности мерзлого слоя грунта ни как среднего его значения, ни как его значения на отдельных интересующих потребителя участках.

Казалось бы, что в качестве альтернативы можно применить расчетный метод распределения температуры в грунте. Основным источником тепла, поступающего в почву, является лучистая

энергия солнца, которая усваивается поверхностным слоем. Это тепло передается в нижележащие слои, а также расходуется на нагревание воздуха и испарение воды. Зная количество поступающего тепла и основные характеристики грунта, вычислить температуру на разных глубинах довольно просто. В таких алгоритмах учитываются тип грунта, его влажность и плотность, толщина снежного покрова, широта местности, а также динамика температуры воздуха. Проводится опора вычислений на непосредственные измерения в одной-двух точках обычно с помощью вытяжных термометров. Есть даже возможность интерактивных расчетов распределения температуры в грунте [6]. С помощью подобных расчетов создаются синтетические карты вплоть до сетки вычислений 1×1 км. Расчеты позволяют не только получать оценку текущего состояния грунта, но и прогнозировать его состояние соответственно среднелиматическим изменениям температуры и влажности почвы. Данные расчета удобны, например, для оценки теплового баланса грунт—атмосфера. Но для целей мониторинга толщины мерзлого слоя грунта, необходимого для многих вышеупомянутых научных и прикладных целей, нужны более плотные и точные экспериментальные данные.

ФОРМУЛИРОВКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Как сказано выше, в настоящее время существует очевидная потребность в создании специализированной измерительной системы [7], которую, в зависимости от поставленных задач можно использовать для мониторинга температурного режима объекта или территории с различной необходимой точностью измерений по вертикали и дискретностью по времени дистанционно и полностью в автоматическом режиме. Это позволит получать усредненные данные для значительных площадей, при необходимости выделить локальные особенности, оперативно корректировать вычисленные значения мощности мерзлого слоя грунта.

Для определенного класса исследований важна не столько глубина границы промерзания грунта, сколько толщина слоя мерзлого грунта [8]. Осенью, и особенно в весенний период, зачастую верхние слои грунта имеют положительную температуру, а значительно ниже располагается замерзший слой. Измерения должны проводиться не в одной конкретной точке и тем более не на подготовленной площадке, а охватывать значительную территорию с различными условиями расстановки датчиков. При этом единичных измерений, проведенных с интервалом в несколько часов, явно недостаточно. Для усреднения данных,

также как и для выделения локальных особенностей, необходимо иметь измерительный прибор, состоящий из нескольких групп датчиков (термокос), расположенных на значительном расстоянии друг от друга в разных условиях (разные типы грунтов, обдуваемость площадки, растительность, затененность и т. п.).

Нормативная глубина промерзания для Подмоскovie (по данным СНиП [9]) составляет 140 см. Эта максимальная за 10 лет измерений величина установлена мерзлотомером Данилина на открытой, очищенной от снега площадке. При глубине снега 50 см толщина мерзлого слоя снижается, как правило, в 3–5 раз. Поэтому для первоначального опытного макета мерзлотомера мы выбрали глубину мониторинга лишь 30 см.

Остальные технические требования к системе мониторинга мощности мерзлого слоя грунта могут быть формализованы следующим образом:

- измерения должны проводиться непрерывно, дискретность записи должна программно перестраиваться от 10 мин до 12 ч;
- разрешение по глубине должно быть не хуже 2.5 см;
- чувствительность термодатчиков должна быть не хуже 0.5 °С;
- количество заглубляемых щупов в косе — не менее 4, шаг расположения щупов в косе — не менее 2 м;
- должно производиться аппаратное или программное усреднение значения мощности мерзлого слоя по каждой косе, а при надобности — и по всем косам;
- измерения должны проводиться дистанционно, без извлечения датчиков из скважин и без нарушений теплового режима, снежного и растительного покровов;
- заглубляемые элементы должны иметь меньшую теплопроводность, чем окружающий грунт;
- приветствуется уменьшение количества коммутирующих проводов.

РАЗРАБОТКА МАКЕТА АППАРАТУРНОГО КОМПЛЕКСА

Согласно сформулированным выше техническим требованиям, был разработан макет аппаратного комплекса, предназначенный для автоматизированного измерения глубины промерзания грунта в нескольких точках наблюдения. Авторами комплекса была использована оригинальная технология, позволяющая проводить измерения без использования сложных и дорогостоящих цифровых систем сбора информации за счет применения схемы преобразования измеряемых вход-

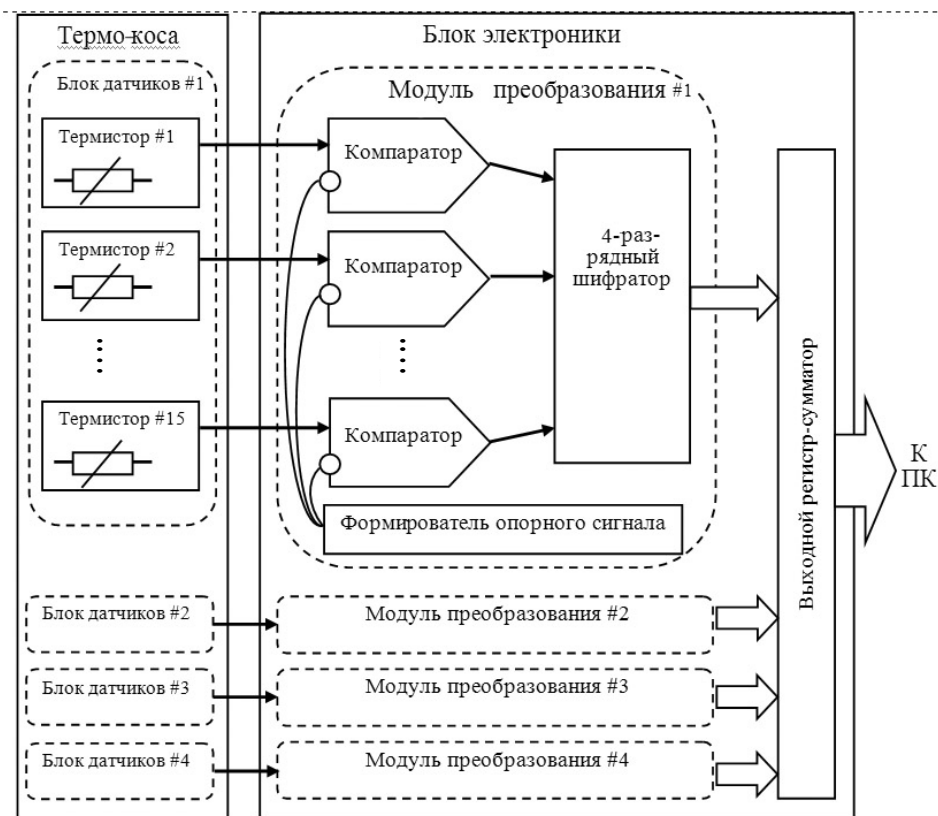
ных аналоговых сигналов, поступающих с термодатчиков, в цифровой вид без использования аналого-цифровых преобразователей. Обобщенная структурная схема комплекса представлена на рисунке.

Как видно из представленной блок-схемы, макет рассчитан на одновременную работу с четырьмя точками наблюдения, в каждой из которых в грунте бурится небольшая скважина, в которую опускается блок датчиков, состоящий из набора одинаковых тарированных термисторов, расположенных на равных расстояниях друг от друга по ее длине.

Сформированные напряжения с терморезисторов поступают на набор идентичных независимых компараторов (по одному на каждый терморезистор). Каждый компаратор настроен на срабатывание при величине сопротивления терморезистора меньше заранее установленного значения, соответствующего значению термосопротивления при 0 °С. Например, для платинового терморезистора PT1000 оно соответствует сопротивлению 1 кОм.

Сигналы с выходов всех компараторов поступают на вход 4-разрядного шифратора, где они преобразуются в 4-битное двоичное число, характеризующее количество терморезисторов, зафиксировавших отрицательную температуру. Если самый нижний 15-й терморезистор оказывается при отрицательной температуре, на всех 4 разрядах выставляется единица независимо от показаний других датчиков. Это означает, что нижняя точка промерзания грунта достигла конца диапазона измерений прибора, и, пока сигнал с 15-го терморезистора не исчезнет, точно сказать, какова мощность мерзлого слоя, невозможно.

Далее полученные 4-битные числа, соответствующие сигналу с каждого из четырех блоков датчиков, поступают на выходной регистр-сумматор, где они преобразуются в 16-битное число, в котором каждые четыре бита последовательно соответствуют выходным сигналам шифраторов. Далее 16-битные данные без особых проблем могут быть переданы и введены в любой цифровой вычислитель или компьютер, например, с использованием интерфейса параллельного порта.



Структурная схема аппаратного комплекса для измерения глубины промерзания грунта

ОБСУЖДЕНИЕ

При работе с такой измерительной системой, как и почти с любой новой системой, естественно возникают трудности методического характера. Например, если 7 кос расположить в лесу, в котором к тому же образуется толстый слой снега, а восьмую — на открытом участке, будет ли это отражать тот факт, что 7/8 исследуемой территории покрыто лесом? Как располагать датчики и как проводить осреднение мощности мерзлого слоя, — вот основные вопросы. Подспорьем в решении этих вопросов может явиться привязка результатов измерений к значениям, взятым из синтетических карт. Как бы то ни было, следующей задачей будет разработка детальной инструкции проведения измерений.

С другой стороны, надо помнить, что основная цель измерений с помощью данного комплекса — не получение точного абсолютного значения мощности мерзлого слоя, а выявление динамики процесса с учетом местных локальных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время нами разработан, изготовлен и прошел испытания опытный макет аппаратного комплекса для измерения глубины промерзания грунта. В ходе первых испытаний макет показал свою пригодность для проведения как научных, так и прикладных исследований.

Предварительные результаты измерений показали, что абсолютная мощность мерзлого слоя грунта и динамика глубины промерзания очень сильно зависят от условий места установки термодатчика (тип грунта, его влажность и плотность, толщина снежного и растительного покровов, освещенность и продуваемость). Максимальная отмеченная разница по абсолютному значению составила 20 % толщины мерзлого слоя. Также получены результаты по динамике температурных процессов. Например, в то время как на открытом месте при резком похолодании было зафиксировано резкое увеличение глубины промерзания (в среднем 10 см за два дня), заглубляемый шуп, расположенный под защитой деревьев и снега, практически не отмечал никакой динамики.

Дальнейшие работы следует направить на корректировку и модернизацию существующего макета, увеличить количество термочувствительных кос и глубину мониторинга, провести разработку детальной инструкции проведения измерений, что позволит в дальнейшем расширить функциональные возможности комплекса.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ № НШ 5545.2018.5, а также в рамках государственного задания ИФЗ и ИТПЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джурик В.И., Лециков Ф.Н. Экспериментальные исследования сейсмических свойств мерзлых грунтов // Международная конференция по мерзлотоведению. Доклады и сообщения. Якутск, 1973. Вып. 6.
2. Кислов К.В., Гравиров В.В. Сейсмическая защита протяженных объектов // Инженерная защита. 2015. № 6. С. 58–65.
3. Мельников В.П., Скворцов А.Г., Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Дубровин В.А. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 171–180.
4. Кислов К.В., Гравиров В.В. Система раннего предупреждения о землетрясении для железных дорог: перспективы, проблемы, решения // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 1. С. 40–45. URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/abst1.php#abst7>.
5. ГОСТ 24847-81 Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания. М.: Изд-во стандартов, 1981. 12 с.
6. Климатический справочник города Санкт-Петербурга. Температура грунта (почвы) и ее распределение по глубине в Санкт-Петербург и Ленинградской области. URL: http://www.atlas-yakutia.ru/weather/spravochnik/temp_grunt/climate_sprav-temp_grunt_260630687.php (дата обращения 27.03.2018).
7. Gravirov V.V., Kislov K.V. An electronic freezometer // 11th International Conference "Problems of Geocosmos", Book of Abstracts. St. Petersburg, Petrodvorets: St. Petersburg State University, 2016. P. 209–210.
8. Кислов К.В., Гравиров В.В. Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры. Серия: Вычислительная сейсмология. Вып. 42. М.: Красанд, 2013, 240 с.
9. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084710> (дата обращения 27.03.2018).

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва (Гравиров В.В., Кислов К.В.)

Институт физики Земли (ИФЗ) им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва (Гравиров В.В., Лиходеев Д.В., Котов А.Н.)

Контакты: Гравиров Валентин Валентинович
gravirov@mail.ru

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

INSTRUMENTAL COMPLEX FOR MEASURING THE DEPTH OF SOIL FREEZING

V. V. Gravirov^{1,2}, K. V. Kislov¹, D. V. Likhodeev², A. N. Kotov²

¹*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences (IEPT RAS), Moscow, Russia*

²*The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia*

The electronic freezometer has been developed for studying of influence of the frozen soil layer thickness on a seismic signal. While the effect of soil temperature on the speed of seismic waves is investigated quite fully, the wave attenuation is only subject for investigation. The electrical properties of frozen soils have also yet to be satisfactorily measured. This instrument allows to carry out monitoring of an average condition of territories or to reveal local features of the area. The measurements are carried out in an automatic mode, without disturbing the natural context of environmental. The various applications to which these instruments can be put makes them indispensable tools for work on weak, loose, swampy ground, for determination of possible loading in road maintenance, low-depth engineering networks, pipelines, etc. For the purposes of initial testing, two prototypes of the device were designed. The pilot registrations were conducted in the autumn-spring period of 2016 and 2017 in the territory of the Moscow Region. The obtained results show that both the absolute thickness of the frozen soil layer and the dynamics of the freezing depth depend very much on the conditions of the thermal sensor location (soil type, moisture and density, thickness of the snow and vegetation cover, illumination and purging). Tests of these prototypes fully confirmed the efficiency of the proposed method of recording the value of the soil freezing thickness.

Keywords: freezometer soil temperature, freezing depth, automation of observations seismic survey, monitoring

REFERENCES

1. Dzhurik V.I., Leshchikov F.N. [Experimental studies of seismic properties of frozen soil]. *Mezhdunarodnaya konferenciya po merzlotovedeniyu. Doklady i soobshcheniya* [International conference on permafrostology. Reports and messages], Yakutsk, 1973, vol. 6. (In Russ.).
2. Kislov K.V., Gravirov V.V. [Seismic protection of extended objects]. *Inzhenernaya zashchita* [Engineering protection], 2015, vol. 6, no. 11, pp. 58–65. (In Russ.).
3. Mel'nikov V.P., Skvortsov A.G., Malkova G.V., Drozdov D.S., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Tsarev A.M., Dubrovin V.A. [Seismic studies of frozen ground in arctic areas]. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], 2010, vol. 51, no. 1, pp. 171–180. (In Russ.).
4. Kislov K.V., Gravirov V.V. [Earthquake early warning for railways: perspectives, problems and solutions]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 1, pp. 40–45. Doi: 10.18358/np-27-1-i4045. (In Russ.).
5. GOST 24847-81 Soil. Methods of determination of depth of seasonal frost penetration. Moscow, Publishing house of standards, 1981. 12 p. (In Russ.).
6. *Klimaticheskij spravochnik goroda Sankt-Peterburga. Temperatura grunta (pochvy) i ego raspredelenie po glubine v Sankt-Peterburge i Leningradskoj oblasti* [Climatic reference book of St. Petersburg. Temperature of soil (soil) and its distribution on depth to St. Petersburg and the Leningrad Region]. http://www.atlas-yakutia.ru/weather/spravochnik/temp_grunt/climate_sprav-temp_grunt_260630687.php. (accessed 27.03.2018). (In Russ.).
7. Gravirov V.V., Kislov K.V. An electronic freezometer. *11th International Conference "Problems of Geocosmos", Book of Abstracts*. St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, 2016, pp. 209–210.
8. Kislov K.V., Gravirov V.V. *Issledovanie vliyaniya okruzhayushchej sredy na shum shirokopolosnoj seismicheskoj apparatury* [Research of influence of the environment on noise of the broadband seismic equipment]. Series: Computing seismology, vol. 42, Moscow, Krasand Publ., 2013. 240 p. (In Russ.).
9. Elektronnyj fond. SP 22.13330.2011 Osnovaniya zdanij i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.01-83 [Joint venture 22.13330.2011 Foundations of buildings and constructions. The staticized editorial office Construction Norms and Regulations 2.02.01-83]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084710> (accessed 27.03.2018). (In Russ.).

Contacts: Gravirov Valentin Valentinovich,
gravirov@mail.ru

Article received in edition 28.06.2018