

3. Кремчеев Э.А. Принципы построения транспортного модуля торфяного предприятия с карьерной технологией добычи / Э.А. Кремчеев, А.В. Михайлов, Д.О. Нагорнов // Горный информационно-аналит. бюллетень (Н.-техн. журнал). – 2011. – № 7. – С. 75–81.

4. Alexandrov G.A. Score mining rents in terms of investment attractiveness of peat mining / G.A. Alexandrov, A.L. Yablonev // E3S Web Conf. Vol. 21, II-nd International Innovative Mining Symposium. – 2017. – Article Number 04011, DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172104011>

5. Larminie J.C. Modification to mean maximum pressure system / J.C. Larminie // Journal of Terramechanics. – 1992. – № 29(2). – P. 239–255.

6. Jansson K.-J. Soil Changes after Traffic with a Tracked End a Wheeled Forest Machine: a Case Study on a Slim Loam in Sweden / K.-J. Jansson, J. Johansson // Forestry. – 1998. – № 1. – P. 57–66.

7. Wang J.X. Modelling and Validation the Grabbing Forces of Hydraulic Log Grapples Used in Forest Operations / J.X. Wang, C.B. Le Doux, Y.X. Li // International Journal of Forest Engineering. – 2005. – Vol. 16, – P. 77–85.

8. Яблонеv А.Л. Обоснование параметров пневмоколесного хода пассивных прицепных машин для транспортирования фрезерного торфа / А.Л. Яблонеv, О.В. Дорогов, // Горный информационно-аналит. бюллетень (Н.-техн. журнал). – 2015. – № 7. – С. 174–177.

9. Телего А.В. Обоснование проходимости транспортно-тракторного агрегата при разработке органогенного сырья / А.В. Телего, А.В. Михайлов, А.В. Большунов // Записки горного института. – 2014. – № 209. – С. 87–90.

10. Яблонеv А.Л., Расчет сдвоенного приводного пневмоколесного прицепа для перевозки фрезерного торфа / А.Л. Яблонеv, О.В. Дорогов // Горный информационно-аналит. бюллетень (Н.-техн. журнал). – 2014. – № 6. – С. 154–157.

УДК [553.97:551.345]:534.8.081.7

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В МЕРЗЛОМ ТОРФЕ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА**

**Иванов Г.Н.**

*Тверской государственный технический университет*

*Фазовый состав воды является важнейшей характеристикой мерзлых торфов. Предложена методика определения количества незамерзшей*

*воды в торфе, заключающаяся в измерении скорости продольных волн путем ультразвукового «просвечивания» в предварительно замороженных образцах при их оттаивании*

Многочисленными исследованиями показано, что при данной отрицательной температуре определенное количество воды в грунтах находится в незамерзшем (жидком) виде. Это объясняется, прежде всего, взаимодействием ее молекул с поверхностью частиц твердой фазы, проявляющимся в виде адсорбции на поверхности смачивания, капиллярных и других поверхностных эффектов. Количественные характеристики этих видов взаимодействия изменяются в зависимости от отрицательной температуры и вместе с концентрацией растворенных в поровой влаге веществ определяют фазовый состав воды. Следовательно, фазовый состав воды в мерзлых грунтах – это достаточно строгое количественное соотношение между твердой и жидкой фазами воды, возникающее при данных термодинамических условиях.

Фазовый состав воды является важнейшей характеристикой мерзлых грунтов, поэтому его изучение находится в числе основных вопросов геокриологии. Он определяет физико-механические, тепловые, электрические и другие свойства мерзлых грунтов. Изменение фазового состава при промерзании и оттаивании тесно связано с возникновением и развитием различных криогенных физико-геологических явлений.

Для определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах в настоящее время применяется главным образом калориметрический метод [1]. Менее широко используются методы, основанные на физико-химических свойствах мерзлых пород: дилатометрический; криоскопический, гигроскопический, растворения. В последнее время все большее применение находят методы, основанные на различии физических свойств влаги в твердой и жидкой фазах. К ним относится ультразвуковой метод, преимуществами которого являются простота, экспрессность, возможность применения в полевых условиях.

Применение ультразвука для определения физического состояния влаги в мерзлых грунтах обусловлено тем, что переход грунтов из талого состояния в мерзлое сопровождается существенным изменением их сейсмоакустических свойств, в частности резким увеличением скорости распространения продольных волн  $V_p$ . Характер увеличения  $V_p$  при переходе от положительных температур к отрицательным зависит от типа грунта и его влажности. Возрастание скорости продольных волн происхо-

дит как за счет замещения воды льдом в порах грунта (т. е. замещения низкоскоростного компонента высокоскоростным), так и за счет цементирующего действия льда. Поскольку для грунта данной пористости и влажности увеличение льдистости равносильно уменьшению количества незамерзшей воды  $W_{Н.З}$ , а изменение льдистости полностью контролируется изменением величины  $V_p$ , определить количество незамерзшей воды в каждом конкретном грунте можно по величине скорости продольных волн.

Для изучения упругих характеристик торфов использовали установку, позволяющую измерять скорости звука в образце торфа при промораживании. Образец размерами  $40 \times 40 \times 250$  в специальной кювете помещали вертикально в теплоизолированную камеру. В верхней части он контактировал с охлаждающим агентом, в результате чего образец торфа промерзал направленно сверху вниз. Для снятия температурных зависимостей скорости звука в образце торфа на уровне оси пьезоэлектрических преобразователей помещали спай термопары. Расстояние от оси пьезопреобразователей до хладагента составляло 50 мм, между пьезопреобразователями (база) – 27 мм.

Методика определения количества незамерзшей воды в торфе заключается в измерении скорости продольных волн путем ультразвукового «просвечивания» в предварительно замороженных образцах при их оттаивании. Одновременно с ультразвуковыми измерениями регистрировали температуру образца. Брали образцы одного и того же вида торфа, но разной влажности, для чего исходную навеску торфа разбавляли дистиллированной водой или подсушивали. Влажность образцов изменялась от 10 до 80%. Готовый образец помещали в кювету и зажимали ультразвуковыми датчиками (пьезопреобразователями). В корпусе кюветы просверлены отверстия диаметром 1,5 мм, через которые в образец вводили спай термопары, второй спай помещали в калориметр с постоянной известной температурой.

Для определения скорости продольных волн  $V_p$  при ультразвуковом «просвечивании» образцов использовали серийную аппаратуру ДУК-20 с датчиками ЦТС диаметром 30 мм собственной частоты 60 кГц.

В основе методики определения количества незамерзшей воды лежит использование ряда кривых  $V_p = f(W_{Н.З})$ , относящихся к водонасыщенным грунтам различных типов, наиболее часто встречающимся в природе [2]. При этом эталонные кривые

$V_p = f(W_{н.з})$  можно получить исключением температуры  $t$  из зависимостей  $V_p = f(t)$  и  $W_{н.з} = f(t)$ , полученной, например, калориметрическим методом хотя бы при двух-трех значениях температуры. Возможность такого подхода к определению количества незамерзшей воды в мерзлом торфе показана на рис. 1а. Эталонная зависимость (см. рис. 1,б) справедлива до начальной влажности  $W_0=85-90\%$ .

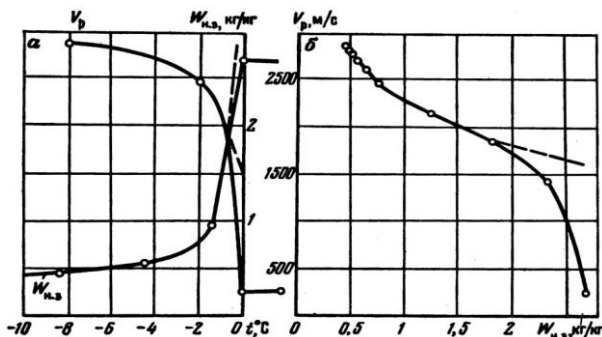


Рис. 1 – Зависимость продольной скорости ультразвука  $V_p$  от количества незамерзшей воды в низинном торфе: а – температурная зависимость; б – зависимость  $V_p$  от  $W_{н.з}$

При больших влажностях значение скорости распространения упругих волн в торфе в талом состоянии увеличивается примерно на порядок. Количество же незамерзшей воды для торфа практически не зависит от начальной влажности. Следовательно, эталонная зависимость скорости ультразвука от количества незамерзшей воды в торфе будет отличаться только в нижней части (в начале промерзания). Эта зависимость представлена пунктирной линией. Однако практическая реализация такого подхода встречает ряд существенных трудностей. Несмотря на то, что характер кривых  $V_p = f(t)$  тесно связан с изменением количества незамерзшей воды, на абсолютные значения скорости  $V_p$  существенно влияют плотность грунта, криогенная текстура, трещиноватость и другие факторы, без учета которых трудно рассчитывать на воспроизводимые результаты.

Другой подход заключается в получении ряда кривых  $V_p=f(t)$  на образцах одного и того же грунта с различной влажностью и с последующим использованием только одной точки каждой из

этих кривых – начала или конца изменения скорости  $V_p$ , соответствующих началу или окончанию фазовых переходов воды [3].

В связи с этим принципиальное значение имеют следствия, вытекающие из сопоставления зависимостей между количеством незамерзшей воды и температурой  $W_{н.з} = f(t)$ , с одной стороны, и общим влагосодержанием грунта и температурой фазовых переходов поровой воды в нем  $W = (t_{ф.п})$  – с другой. Физическая идентичность этих двух зависимостей следует из непосредственного их сопоставления [4]. Следовательно, зависимость количества незамерзшей воды от температуры тождественно отражает зависимость температуры оттаивания мерзлых грунтов от исходной влажности, и наоборот. В связи с такой однозначностью зависимость количества незамерзшей влаги от температуры можно определить на основе зависимости температуры фазовых переходов от влажности.

Следует отметить, что из-за переохлаждений, которые в реальных условиях, как правило, всегда предшествуют кристаллизации, а также по некоторым другим причинам, температуры замерзания несколько ниже температур оттаивания. Поэтому определение зависимости количества незамерзшей воды целесообразнее проводить по температурам оттаивания мерзлых грунтов.

Образцы замораживали в морозильной камере при температуре 10-12 °С в течение 1-2 сут. Частота измерения продольной скорости  $V_p$  и температуры  $t$  при оттаивании образца составляла одно измерение за 1-5 мин. Полное оттаивание образцов в зависимости от их влажности происходило за 2-6 ч. При построении зависимостей  $V_p = f(t)$  использовали температуру в центре образца.

На рис.2,а показана зависимость продольной скорости ультразвука в образце торфа влажностью 50% от температуры. Довольно большой наклон кривой при подходе к температуре окончания фазовых переходов свидетельствует о хорошей разрешающей способности ультразвукового метода, причем разрешающая способность увеличивается с увеличением влажности образца. Однако быстротечность процесса фазовых переходов в образце на заключительной его стадии при больших влажностях затрудняет точное определение температуры полного оттаивания образца при использовании дискретного способа наблюдений, при котором частота замеров не превышает одного в минуту.

На рис. 2,б приведен график зависимости количества незамерзшей воды от температуры в низинном торфе степенью разложения 25%, зольностью 30%.

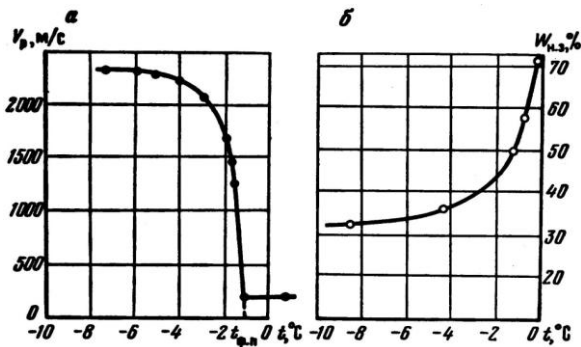


Рис. 2 – Зависимости продольной скорости ультразвука в торфе влажностью  $W_0=50\%$  от температуры (а) и количества незамерзшей воды  $W_{н.з}$  в торфе от температуры (б)

Для выражения зависимости использовали графики  $V_p = f(t)$ , построенные для образцов различной исходной влажности. Полученные результаты согласуются с данными по определению количества незамерзшей воды в мерзлом торфе калориметрическим методом [5].

Таким образом, описанная методика позволяет, довольно просто и с хорошей точностью определять количество незамерзшей воды в мерзлом торфе с помощью ультразвука.

### Библиографический список

1. Цытович Н.А. *Механика мерзлых грунтов*. М.: Высшая школа, 1973. – 445 с.
2. Фролов А.Д. *Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов*. 2-е изд. – Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН. 2005. -607 с.
3. *Новые методы исследования состава, строения и свойств мерзлых грунтов / Под ред. С.Е. Гречищева, Э.Д. Еришова*. М.: Недра, 1983. – 140 с.
4. Чистотинов Л.В. *Миграция влаги в прмерзающих водонасыщенных грунтах*. М.: наука, 1973. – 144 с.
5. *Исследования фазового состава воды в торфе при низких температурах // Коллоидный журнал / И.И. Лиштван, Г.Н. Бровка, П.Н. Давидовский*. 1979. Т.41 № 6 – С.1095 – 1099.