

УДК 537.874.34:53.093

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ ГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ПО СИГНАЛАМ ГНСС

М. Г. Дембелов¹, Ю. Б. Башкуев¹, В. Б. Хаптанов¹, А. М. Дембелова¹, А. В. Лухнев²

¹Институт физического материаловедения СО РАН

²Институт земной коры СО РАН

Статья поступила в редакцию 4 ноября 2016 г.

Аннотация. Сравнительный анализ прямых измерений глубины протаивания грунтов криолитозоны, результатов наземных радиоволновых зондирований и GPS измерений показал принципиальную возможность определения глубины протаивания грунтов криолитозоны с помощью радиосигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Рассмотрены ряды многолетних наблюдений полной тропосферной зенитной задержки (ZTD), ее «влажной» составляющей (ZWD) и влагосодержания тропосферы (IWV, PW) для пункта наблюдения ТИХИ. Для более точного измерения влагосодержания тропосферы определена линейная регрессия между приземной температурой (T) и «средневзвешенной» температурой тропосферы (T_m) для п. Тикси за 2015 г. Определены межгодовые вариации усредненной в теплое время года «влажной» компоненты тропосферной задержки и уровня влагосодержания над пунктом измерений ТИХИ. Установлен высокий коэффициент взаимной корреляции между глубиной протаивания грунтов арктического побережья за период с 2005г. по 2015 г. и данными по ZWD и PW. Определены параметры геоэлектрического разреза и глубина протаивания многолетней мерзлоты арктического побережья в районе п. Тикси по данным интерпретации радиомипедансных и георадарных зондирований криолитозоны.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, радиоимпедансное зондирование, георадиолокация, GPS, полная тропосферная зенитная задержка, метеорологические данные.

Abstract. A comparative analysis of direct measurements of the depth of thawing soils of the permafrost zone, results of ground radio wave soundings and GPS measurements has shown the fundamental possibility of detecting the depth of thawing permafrost soils using GNSS radio signals. Rows of long-term observations of total zenith troposphere delay (ZTD), its “wet” component (ZWD) and troposphere moisture content (IWV, PW) over the observation point TIXI were considered. A linear regression between surface air temperature (T) and the “weighted mean” temperature of troposphere (T_m) was found in order to measure more exactly the moisture content of the troposphere for Tiksi in 2015. Inter-annual variations of the average “wet” component in the warm season of tropospheric delay and the moisture content level above the point of measurement TIXI were calculated. A high coefficient of correlation between the depth of thawing soils of the Arctic coast in the period since 2005 to 2015 and data on ZWD and PW was established. Parameters of the geoelectric section and the depth of the permafrost thawing of the Arctic coast in the area of Tiksi according to the interpretation of radio impedance and georadar soundings in permafrost zone were detected.

Key words: permafrost, radio impedance soundings, GPR, GPS, total zenith tropospheric delay, meteorological data.

Введение

Цель работы заключается в исследовании возможности использования бесконтактных дистанционных радиоволновых методов для определения глубины протаивания многолетней мерзлоты.

Район исследований относится к зоне многолетней мерзлоты. Здесь на побережье Северного Ледовитого океана зарегистрирован нижний предел температуры мерзлоты $-(12 \div 14)^\circ\text{C}$ [1]. В связи с возрастающим интересом к освоению побережья и шельфа Северного Ледовитого океана представляется актуальным изучение изменений свойств и структуры многолетней мерзлоты радиофизическими методами. Почво-грунты Северной Якутии характеризуются мерзлотным типом температурного режима. В работе [2]

исследован температурный режим почв (тундрового криозема) на п-ове Быковский, который находится в районе бухты Тикси. Средняя температура почвы самого теплого месяца в арктической тундре равна $1,5^{\circ}\text{C}$. При средней продолжительности безморозного периода в 61 сутки годовая сумма положительных среднесуточных температур равна 75°C . Количество поступающей тепловой энергии для тундровых суглинистых криоземов равно $1300\div 2400$ ккал/ м^2 в год.

Методы исследований

Рассмотрим возможности применения дистанционного радиоволнового метода определения глубины протаивания многолетней мерзлоты с использованием высокостабильных радиосигналов ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO). Тропосферная зенитная задержка сигналов ГНСС (ZTD) обусловлена эффектами рефракции из-за неоднородностей диэлектрической проницаемости атмосферы [3]. Величина ZTD является разностью между предполагаемой прямой линией, по которой сигнал распространяется со скоростью света в вакууме и фактической длиной пути от источника до приемника. Полная тропосферная зенитная задержка является суммой «сухой» или гидростатической (ZHD) и «влажной» (ZWD) компонент ($ZTD=ZHD+ZWD$). Гидростатическая задержка хорошо определяется по данным поверхностных барометрических измерений в месте приема сигнала. «Влажная» задержка в основном зависит от содержания атмосферного водяного пара, который в теплое время года оказывает наиболее существенное влияние на скорость распространения GPS сигналов. В целом же «влажная» составляющая вносит значительно меньший вклад в ZTD, особенно в зимнее время года.

Метеорологическая характеристика района исследований

В п. Тикси средняя многолетняя температура приземного воздуха в самый холодный месяц года (январь) составляет -37°C , а в самые теплые месяцы (июль и август) - $+3^{\circ}\text{C}$ и $+8^{\circ}\text{C}$ соответственно. Каждое лето бывают короткие

относительно жаркие периоды с температурой выше $+20^{\circ}\text{C}$. Перепад между среднемесячной температурой самого холодного и самого теплого месяца составляет в среднем 43°C . Полярная ночь в поселке длится 67 суток, с 19 ноября по 24 января, полярный день — 86 суток, с 10 мая по 4 августа. На рис. 1 показана вариация годовой температуры в п. Тикси за 2015 г. Приземные метеорологические данные получены по метеостанции аэропорта Тикси [4] (рис. 2).

Данные по протаиванию грунта получены на измерительном пункте, расположенном на п-ове Быковский в 8 км от метеостанции аэропорта. В районе п. Тикси преобладают скальные грунты с максимальным сезонным протаиванием за 2003-2015 гг. в пределах 25÷43 см.

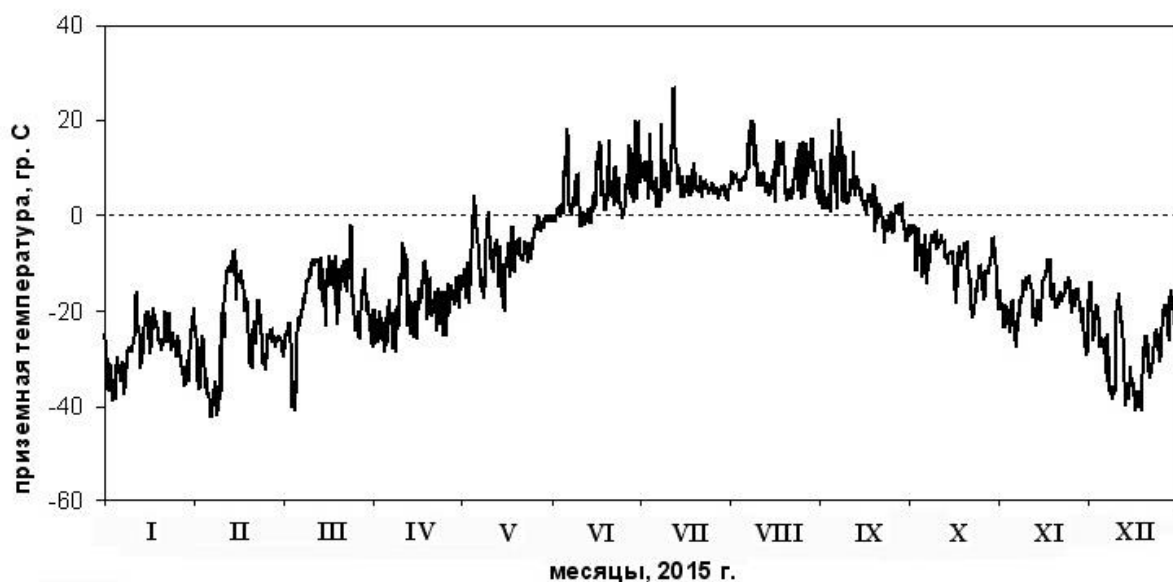


Рис. 1. Годовой ход приземной температуры в п. Тикси за 2015 г.

На рис. 3 приведены графики усредненной приземной температуры в теплое время года, суммарного количества атмосферных осадков и максимальной глубины протаивания за 13-летний период наблюдений.



Рис. 2. Схема расположения метеостанций и пункта GPS наблюдения ТИХИ в районе п. Тикси

Взаимная корреляция межгодовых усредненных значений температуры в теплый период года и максимальной глубины протаивания грунта равна примерно 0,59 (рис. 3). В 2007 г., когда наблюдалось максимальное протаивание за весь срок наблюдения (43,5 см), усредненная температура в теплое время не была максимальной за этот период наблюдений. В то же время в предшествующий год максимального оттаивания можно наблюдать пиковое значение годового количества атмосферных осадков. В октябре 2006 г. почва имела сильное увлажнение и достаточно мощный снеговой покров, который экранировал волну холода и способствовал неглубокому сильному промерзанию грунта в районе п. Тикси. Недостаточно сильное промерзание

грунта зимой 2006-2007 гг. создало хорошие условия для его глубокого протаивания в конце лета 2007 г.

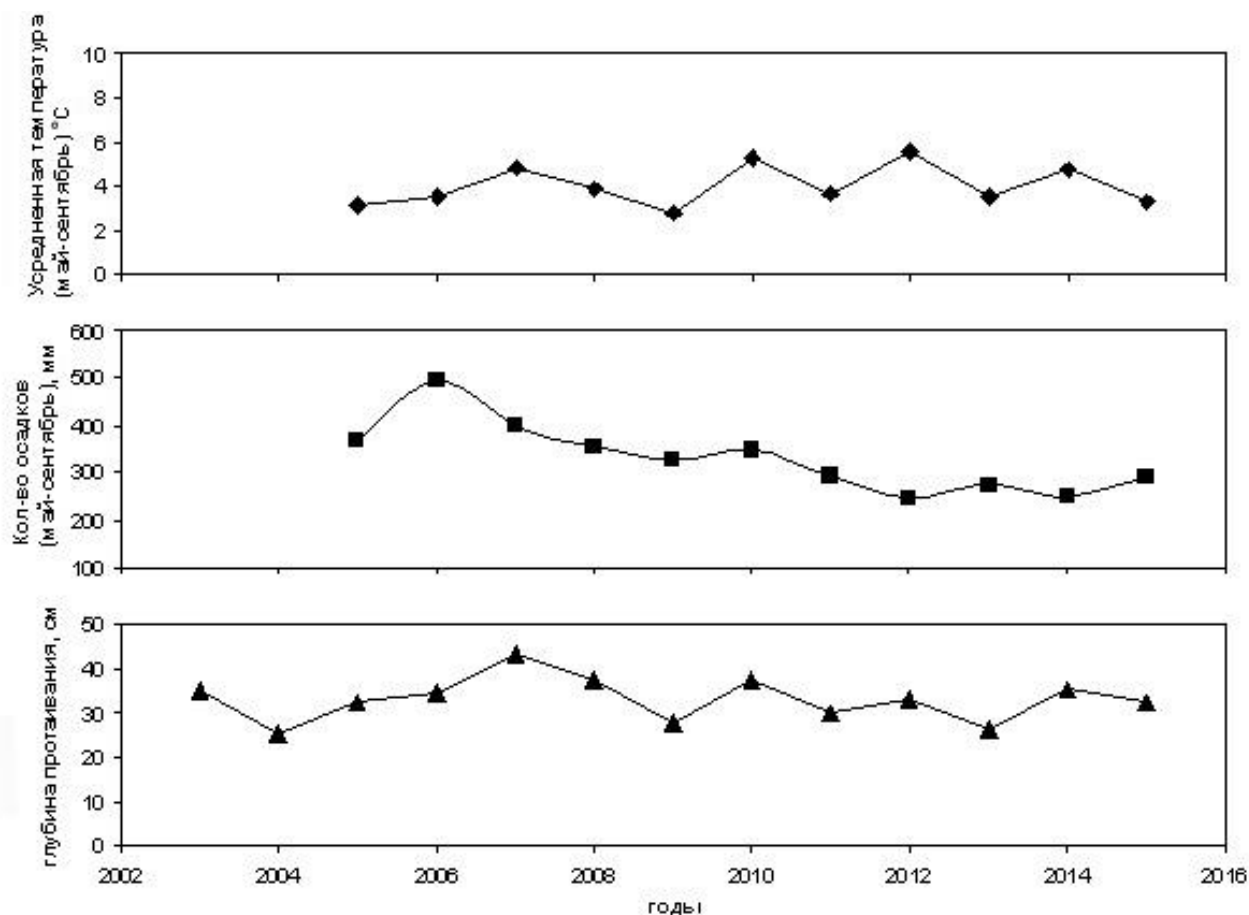


Рис. 3. Межгодовые вариации усредненной приземной температуры воздуха за май-сентябрь, суммарного количества атмосферных осадков и максимальной глубины протаивания за период исследований

Определение границы протаивания грунта радиоимпедансным и георадиолокационным методами

В июле 2015 г. методами радиоимпедансного и георадарного зондирования определены параметры геоэлектрического разреза мерзлых почв и горных пород арктического побережья в окрестностях п. Тикси. Вдоль побережья бухты Тикси в 200 м от берега исследован детальный профиль протяженностью 2 км из 20 пунктов измерений поверхностного импеданса, сопровождаемый непрерывным георадиолокационным зондированием (рис. 2). Для

георадиолокации использован георадар «Око-2» с антенным блоком АБ 400 с центральной частотой зондирования 400 МГц. Результаты измерений модуля $|\delta|$ и фазы $\arg \delta$ поверхностного импеданса на частотах 25, 320 и 660 кГц совместно с радарограммой представлены на рис. 4. Радарограмма показывает насыщенный влагой талый слой толщиной $0,2 \div 0,24$ м с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx 25$. Средняя часть профиля от 0,3 км до 1,7 км отличается меньшей электропроводностью. Об этом свидетельствует меньшее затухание сигнала георадара в талом слое и наличие выраженных кратных волн. Это может быть вызвано большей дренированностью центральной части профиля из-за наличия уклона и водотоков. В то же время на 110 метровом профиле на территории полярной геокосмофизической обсерватории ИКФИА СО РАН, расположенной в 5 км от побережья (рис. 2), талый слой почвы имеет толщину около 50 см (рис. 5).

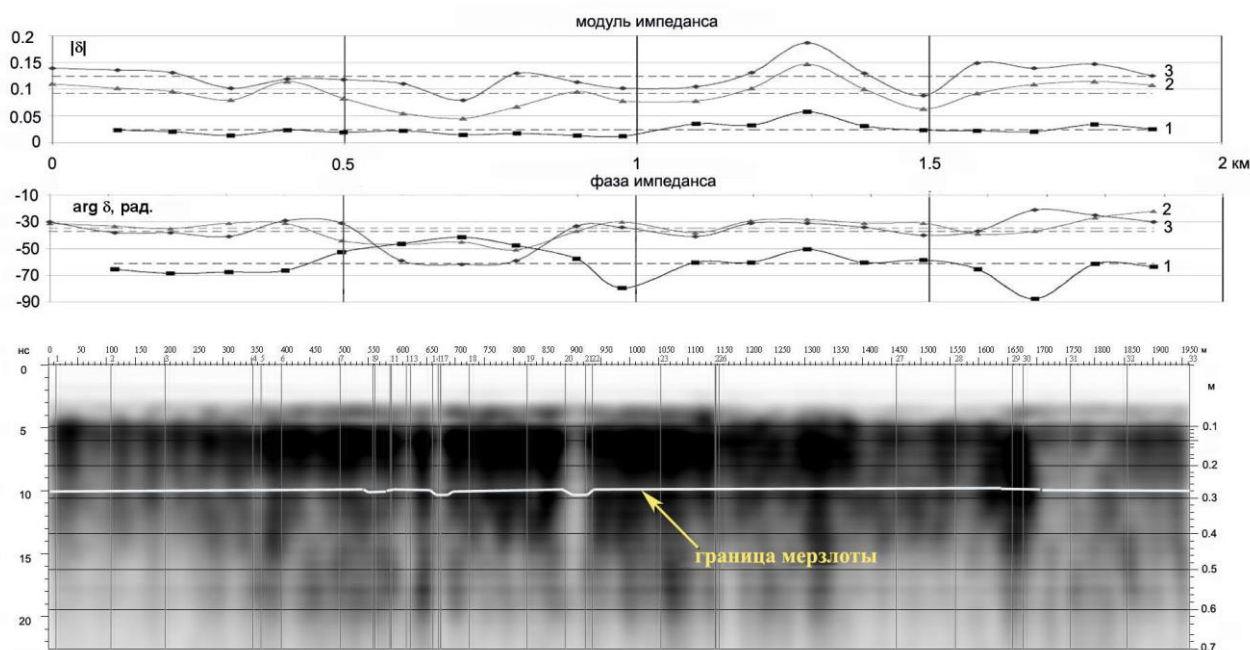


Рис. 4. Результаты измерений модуля $|\delta|$ и фазы $\arg \delta$ поверхностного импеданса на частотах 25 (1), 320 (2) и 660 кГц (3) и радарограмма на двухкилометровом профиле побережья бухты Тикси

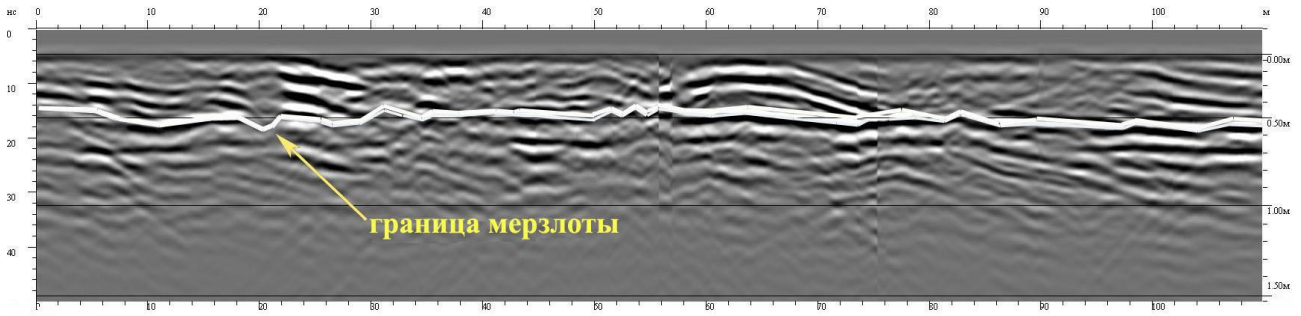


Рис. 5. Радарограмма 110 метрового профиля на территории ПГО ИКФИА СО РАН

Рассмотрим результаты определения параметров геоэлектрических разрезов (ГЭР) криолитозоны. Здесь выделены мерзлые тундровый криозем и осадочные и кристаллические горные породы. Интерпретация радиоимпедансных зондирований состояла в решении обратной задачи на основе метода регуляризации А.Н. Тихонова [1]. В качестве примера на рис. 6 приведены результаты интерпретации частотной зависимости поверхностного импеданса криолитозоны на осадочных породах (пункт наблюдения 5). Наиболее типичными для летней тундры являются геоэлектрические разрезы типа $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ с пониженным сопротивлением осадочного верхнего почвенного слоя. Сопротивление мерзлого слоя изменяется в пределах от 1040 до 5300 Ом·м.

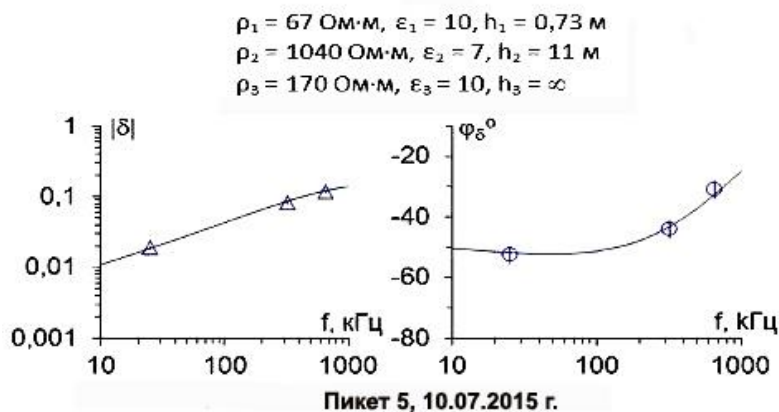


Рис. 6. Результаты интерпретации радиоимпедансных зондирований на побережье Северного Ледовитого океана в теплое время года

Тропосферная зенитная задержка, влагосодержание и глубина протаивания грунтов

В настоящее время в литературе слабо рассмотрены радиоволновые подходы к изучению многолетних вариаций глубины сезонного протаивания грунтов, в том числе ее зависимость от различных радиометеорологических факторов, таких как тропосферная зенитная задержка и индекс рефракции.

В п. Тикси расположен постоянный пункт GPS измерений ТИХІ (рис. 2), который входит в мировую сеть IGS. Результаты обработки первичных GPS данных по программе GAMIT GLOBK дают непрерывные атмосферные данные в виде полной тропосферной зенитной задержки (ZTD) [3]. На рис. 7 представлены вариации значений ZTD в пункте GPS наблюдений ТИХІ за период с 2005 по 2015 гг.

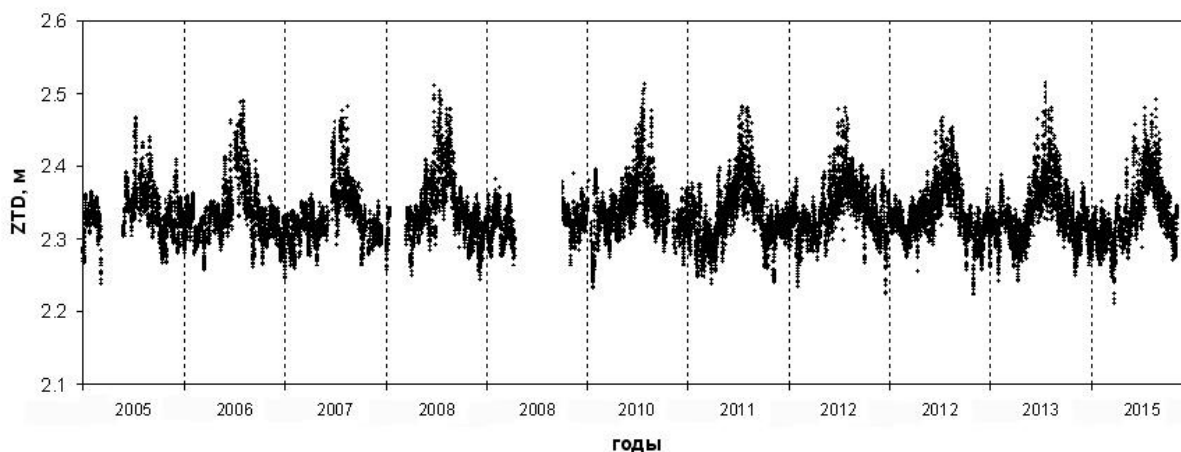


Рис. 7. Межгодовые вариации полной тропосферной зенитной задержки ZTD в пункте измерений ТИХІ.

Данные по «влажной» компоненте ZWD позволяют определить количество суммарного водяного пара (IWV , $[кг/м^2]$) или количество осаждаемой воды (PW , $[м]$) над пунктом измерения. Высота колонки жидкой воды PW связана с параметром IWV соотношением $PW=IWV/\rho$, где ρ - плотность воды, $кг/м^3$. В работах [3, 5] подробно описан метод определения влагосодержания тропосферы по атмосферным данным GPS измерений. Формула для суммарного водяного пара IWV [3, 5]:

$$IWV = 10^6 \frac{T_m}{k_2 \cdot R_w} ZWD. \quad (1)$$

Здесь $k_2=3,73 \cdot 10^5$ - вторая рефракционная константа, $K^2/\text{мбар}$; $R_w \approx 4,6$ Дж· K^{-1} кг $^{-1}$ - специальная газовая постоянная для водяного пара; T_m - «средневзвешенная» температура над пунктом приема сигнала, которая по определению вводится в виде отношения [6]:

$$T_m = \frac{\int_0^\infty \frac{e}{T} dh}{\int_0^\infty \frac{e}{T^2} dh}. \quad (2)$$

Здесь e – упругость водяного пара, мбар; T – абсолютная температура, К.

Параметр ZWD определяется из первичных данных по ZTD путем вычитания из них данных по ZHD, которые в свою очередь рассчитываются по формуле Саастамоинена [6]: $ZHD=0,002277 \cdot p$, здесь p – атмосферное давление на уровне точки приема, мбар.

На рис. 8 показаны годовые вариации ZTD, определенные по GPS измерениям в пункте TIXI, вариации ZHD, рассчитанные по формуле Саастамоинена, а также вариации ZWD, полученные в результате вычитания значений ZHD из ZTD.

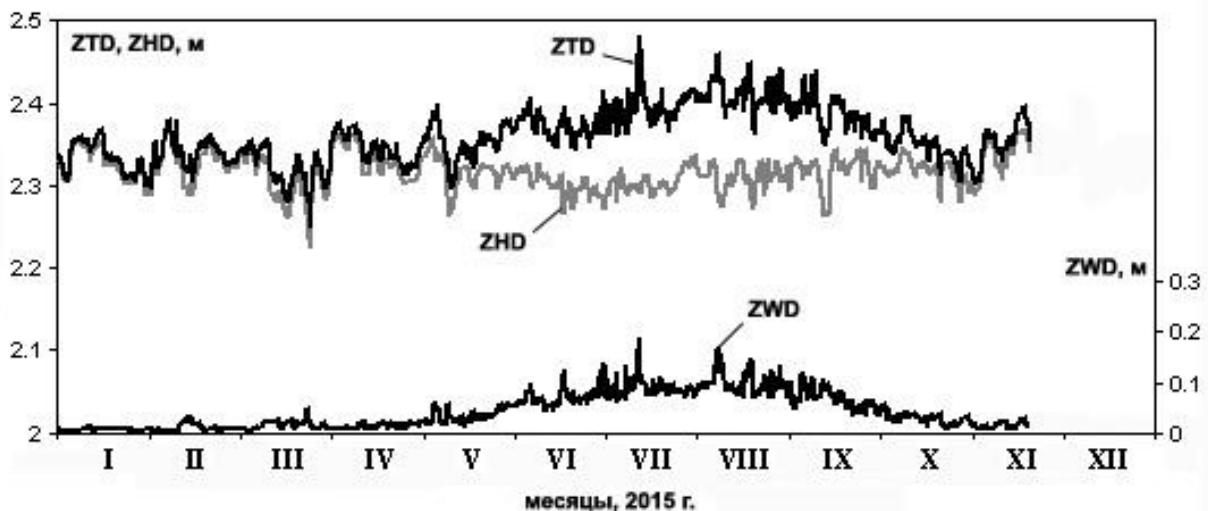


Рис. 8. Вариации ZTD, ZHD и ZWD по месяцам 2015 г. для пункта TIXI.

На основе данных метеорологических радиозондирований до 35 км рассчитаны значения «средневзвешенной» температуры (T_m) по формуле (2). На рис. 9 приведено уравнение линейной регрессии $T_m=57,36+0,77\cdot T$ между приземной температурой (T) и «средневзвешенной» температуры (T_m) для пункта наблюдения «Метеостанция РОСГИДРОМЕТ» в 2015 г. Из уравнения следует, что «средневзвешенная» температура T_m вплоть до высоты нижней стратосферы над пунктом измерений может быть определена по данным приземной температуры воздуха. Отметим, что в работе [7] для расчета влагосодержания использовалось фиксированное среднее значение $T_m=260^\circ\text{К}$. При этом погрешность определения PW может достигать $\pm 10\%$.

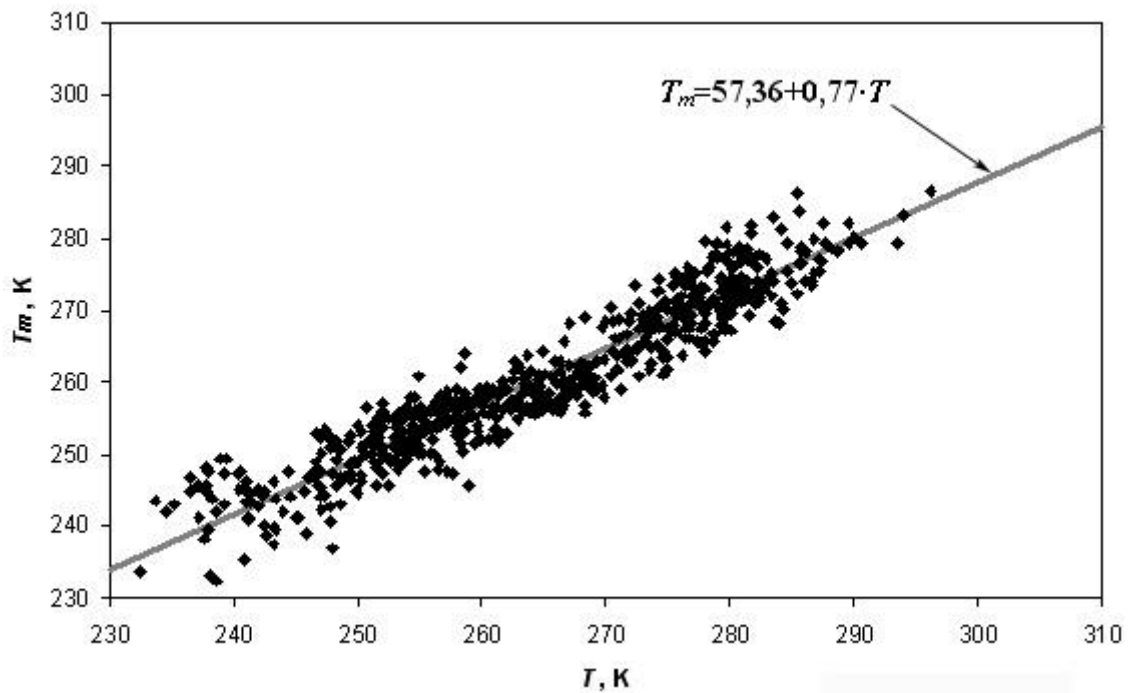


Рис. 9. Соотношение температур T и T_m , полученных по данным метеорологических зондирований (метеостанция РОСГИДРОМЕТ) в 2015 г.

Сравнительный анализ межгодовых изменений ZWD, PW и максимального протаивания грунта

В результатах измерений в пункте наблюдения ТИХІ за период с 2005 по 2015 г. отсутствуют данные с 14 апреля по 3 октября 2009 г. (рис. 7). Недостающие результаты восстановлены по данным метеостанции аэропорта

Тикси с использованием модели Саастамоинена для «влажной» компоненты тропосферной задержки [3, 5]. По формуле (1) рассчитаны значения уровня влагосодержания (IWV, PW) за весь период с 2005 по 2015 гг. Для периода с мая по сентябрь месяцы, когда приземная температура превышает 0°C , выполнено усреднение полученных ежегодных данных по ZWD и PW. На рис. 10 приведены межгодовые вариации измеренных значений максимальной протаивания в пункте наблюдения на п-ве Быковский (I) и усредненные в теплое время года значения ZWD (II) и PW (III).

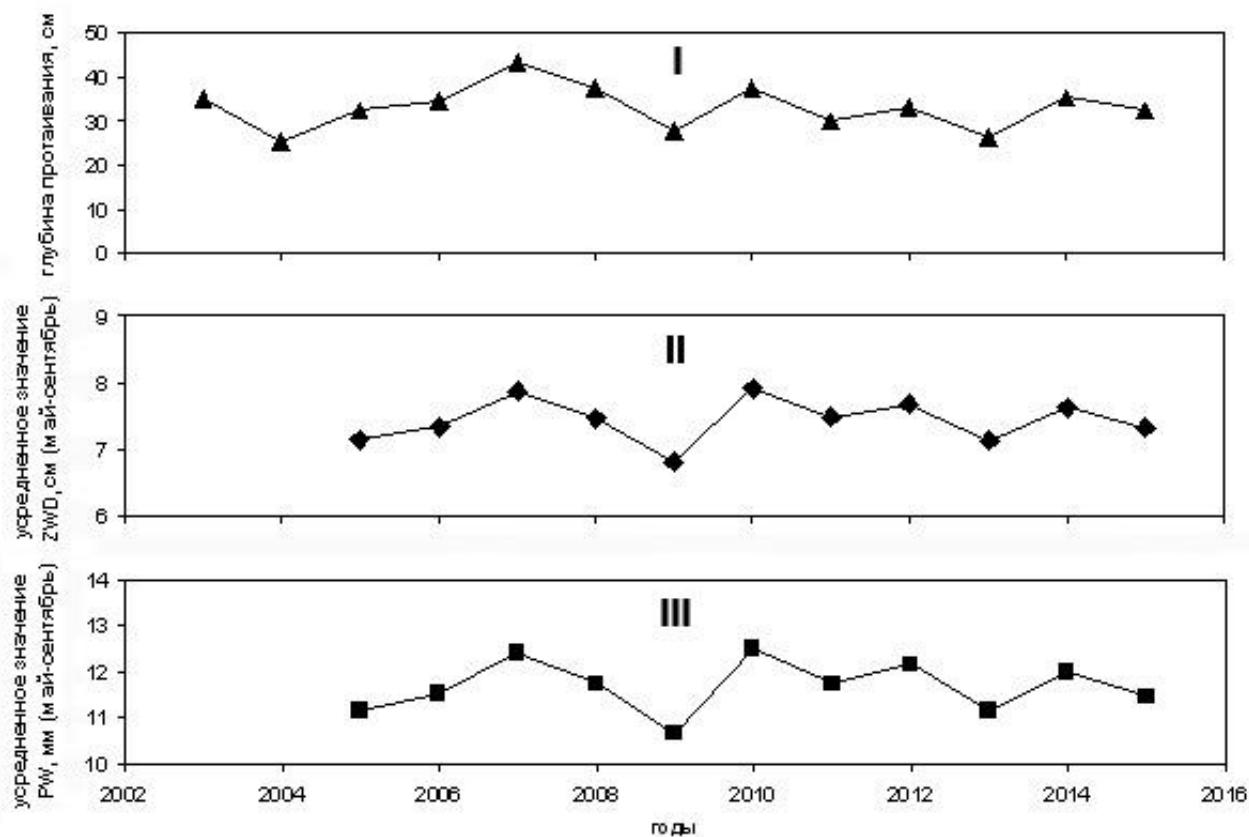


Рис. 10. Межгодовые вариации максимальной глубины протаивания (I), усредненные значения «влажной» составляющей тропосферной задержки (ZWD) (II) и влагосодержания тропосферы (PW) (III) за май-сентябрь 2003-2015

гг.

Коэффициент взаимной корреляции данных на графиках II и III равен 0,99, то есть «влажная» компонента полной тропосферной зенитной задержки (ZWD) функционально описывает влагосодержание тропосферы над пунктом приема

GPS сигналов. Коэффициент взаимной корреляции данных на графиках I и II равен 0,82. Такая высокая корреляция данных по глубине протаивания грунта в прибрежной зоне с данными ZWD GPS измерений говорит о возможности определения глубины протаивания грунта и ее вариаций с помощью радиосигналов ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO).

Заключение

По результатам многолетних наблюдений получены ряды данных полной тропосферной зенитной задержки (ZTD), ее «влажной» составляющей (ZWD) и влагосодержания тропосферы (PW) для пункта наблюдения ТИХІ. Для более точного определения влагосодержания тропосферы определена линейная регрессия между приземной температурой (T) и «средневзвешенной» температурой тропосферы (T_m) для п. Тикси за 2015 г.

Определены межгодовые вариации усредненных в теплое время года значений «влажной» компоненты тропосферной задержки и уровня влагосодержания над пунктом измерений ТИХІ. Установлен высокий коэффициент взаимной корреляции межгодовых данных по глубине протаивания грунтов арктического побережья и данных по ZWD и PW.

По данным интерпретации радиомипедансных и георадарных зондирований криолитозоны арктического побережья в районе п. Тикси определены параметры геоэлектрического разреза мерзлых грунтов и глубина протаивания многолетней мерзлоты.

Сравнительный анализ данных прямых измерений глубины протаивания грунтов криолитозоны, данных наземных радиоволновых измерений и измерений по радиосигналам ГНСС показал принципиальную возможность определения глубины протаивания грунтов криолитозоны с помощью радиосигналов ГНСС.

Литература

1. Мельчинов В.П., Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г. Электрические свойства криолитозоны востока России в радиодиапазоне. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 257 с.
2. Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдов С.П., Давыдова А.И., Остроумов В.Е., Холодов А.Л., Сороковиков В.А., Шмелев Д.Г. Температурный режим почв северной Якутии // Почвы холодных областей: генезис, география, экология: Материалы научной конференции с международным участием. Улан-Удэ, 2015. С. 110-111.
3. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В. и др. Диагностика содержания атмосферного водяного пара по данным GPS-измерений // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. - № 2. с. 172-177.
4. www.rp5.ru
5. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В., Лухнева О.Ф., Саньков В.А. Влагосодержание тропосферы в Байкальском регионе по данным GPS измерений. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar16/10/text.pdf>
6. Bevis M. et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // Journal of Geophysical Research. vol. 97, no d14, P. 15787-15801. 1992.
7. Куницын В. Е., Нестеров И. А., Терешин Н. А. Анализ влагосодержания атмосферы по данным приемников GPS // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. №6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/12/text.pdf>

Ссылка на статью:

О возможности определения глубины протаивания грунтов криолитозоны по сигналам ГНСС. М.Г.Дембелов, Ю.Б.Башкуев, В.Б.Хаптанов, А М Дембелова, А.В.Лухнев. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/8/text.pdf>