

ОСОБЕННОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ ВАРИАЦИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

А.Н. Романов

Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия; ran@iwep.ru

Исследовано влияние температуры в интервале от -10 до $+20$ °С и объемной влажности на диэлектрические и радиоизлучательные характеристики ягеля, бриевых мхов, сфагнома, торфа в микроволновом диапазоне. Установлены зависимости диэлектрических и радиоизлучательных характеристик растительности от температуры и объемной влажности. Показано, что температурные зависимости показателей преломления электромагнитных волн, используемых при зондировании, различаются для живой и отмершей растительности.

Тундра, растительность, диэлектрические характеристики, микроволновый диапазон

PECULIARITIES OF DIELECTRIC AND EMISSIVITY CHARACTERISTICS OF TUNDRA VEGETATION IN THE MICROWAVE RANGE AT TEMPERATURE AND MOISTURE VARIATIONS

A.N. Romanov

Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, 1, Molodezhnaya str., Barnaul, 656038, Russia; ran@iwep.ru

The influence of temperature varying from -10 to $+20$ °C and of the volume humidity on the dielectric and emissivity behavior of reindeer moss, moss, sphagnum, and peat in the microwave range has been investigated. The dependence of the dielectric and emissivity behavior of vegetation on temperature and volume humidity has been determined. The temperature dependencies of refractive indices of living and dead vegetation have been demonstrated to differ.

Tundra, vegetation, dielectric properties, microwave range

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем современности является деградация растительного покрова планеты, связанная с вырубкой лесов, изменением видового состава растительных сообществ, исчезновением отдельных видов растительности, антропогенным воздействием. Эта проблема особенно актуальна для северных стран Европы, а также других арктических территорий, значительную часть которых занимает тундра [Evans, 1997; Kashulina et al., 1997].

Основные причины деградации растительности тундры: промышленная деятельность, связанная с интенсификацией нефтегазодобычи в районах Арктики, отчуждением и техногенным загрязнением территорий [Buchkina et al., 1998; Forbes, Jefferies, 1999; Oostdam et al., 2005; Kozak et al., 2013]; перевыпас одомашненного северного оленя [Rickbeil et al., 2015]; влияние городов как тепловых центров [Virtanen et al., 2002]; возможное влияние изменений климата, включая таяние льдов и вечной мерзлоты [Tutubalina, Rees, 2001; Raynolds et al., 2008].

Сокращение маршрутов кочевания в результате отторжения земель под объекты газодобывающей промышленности при одновременном интенсивном наращивании оленьего поголовья в 1990–2000 гг. привело к негативным последствиям, связанным с деградацией тундровой растительности в результате перевыпаса (в первую очередь ягеля как основного корма северных оленей) [Мурашко, Даллманн, 2011; Колосов, Калашников, 2013; Первалова, 2015], существенному изменению структуры растительных сообществ, снижению биомассы, особенно в лишайниковых тундрах, активизации процессов эрозии [Головатин и др., 2008].

Растительный покров тундры как один из компонентов экосистемы тесно связан с другими компонентами: рельефом, почвой, геокриологическими условиями. На изменение биоразнообразия тундровой растительности заметное влияние оказывает температура многолетнемерзлых пород и растительности. Техногенное воздействие на окружающую среду, наблюдаемое в результате ин-

тенсификации нефтегазодобывающей промышленности, способствует повышению температуры. Увеличение мощности мохового и лишайникового покрова приводит к уменьшению глубины сезонного протаивания и понижению температуры почв [Москаленко, 2009].

Динамика экосистем тундры исследуется методами имитационного моделирования [Кряжмский и др., 2011] с использованием спутниковых данных и таксономической системы морфологических ландшафтных единиц [Пейль, 2011]. Для оценки степени деградации почвенно-растительного покрова тундры изучены взаимосвязи между продуктивностью растительности, агрохимическими и физическими свойствами почвогрунтов [Васильевская и др., 2006; Григорьев и др., 2011]. По данным дистанционного зондирования арктических территорий показано, что на участках техногенеза развитие растительности зависит от форм и степени воздействия, особенностей биотопа и коренных фитоценозов [Русанова, 2000; Телятников, Пристяжнюк, 2006; Московченко, 2013; Мачулина, 2014].

Из-за необходимости регулирования антропогенной нагрузки на растительные сообщества тундры на первый план выдвигается задача разработки оперативных методов дистанционной диагностики растительности на больших площадях. Значительная часть работ, опубликованных к настоящему времени, посвящена исследованию спектральных характеристик растительности в оптическом и инфракрасном диапазонах. Установлена корреляция коэффициентов спектральной яркости с биометрическими и агрометеорологическими характеристиками растительности [Блохин, Незамов, 2010]. Показано, что на спектральные характеристики космических снимков по-разному влияют компоненты геоландшафта (коренная геология, рельеф, рыхлый покров четвертичных отложений, почвы, растительность) [Добрецов и др., 2005].

Для оценки содержания воды в растительности предложено использовать вегетационный и водный индексы, определяемые по данным гиперспектрального дистанционного зондирования [Сагалович и др., 2004]. Разработан способ дистанционной оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального зондирования [Способ..., 2009]. Материалы космической съемки и ГИС применялись для количественной оценки изменений растительного покрова Тазовского полуострова [Корниенко, 2011; Корниенко и др., 2013] и островов Северного Ледовитого океана [Аммосова и др., 2011]. Разработана комплексная технология картографирования и мониторинга техногенного растительного покрова [Зольников и др., 2010]. На основе мультитременного анализа космических данных видимого и

теплогового диапазонов исследовались процессы, характеризующие сукцессии лиственной и лишайниковой растительности [Корниенко и др., 2005].

Совместная комплексная обработка радиолокационных и многоспектральных оптических изображений позволяет улучшить возможность дистанционной классификации земных покровов и количественной оценки биофизических параметров древесной растительности [Бондур, 2007; Бондур, Чимитдоржиев, 2008; Бондур и др., 2012]. Исследование зависимостей диэлектрических характеристик древесной растительности от температуры позволило выявить наличие фазового перехода первого рода, соответствующего переходу воды в лед, а также фазовых переходов второго рода, сопровождавшихся перестройкой структуры воды [Бордонский, 2013].

Разработка контактных и дистанционных методов оперативной диагностики состояния растительного покрова тундры базируется на изучении особенностей распространения и взаимодействия электромагнитных волн с растительностью или отдельными элементами растений (листья, стебли, ствол), определении зависимостей диэлектрических и радиоизлучательных характеристик растительности от типа растительности, температуры, влажности и фазового состава влаги [Жулинская, 2006].

Микроволновое излучение подстилающей поверхности с верхним растительным слоем зависит от физических характеристик растительности (толщина и биомасса растительного слоя, влагосодержание, температура), типа подстилающей поверхности (вода, незамерзшая или мерзлая почва) и ее физических свойств (для воды – температура и соленость, для почвы – температура, влажность, засоленность, глубина промерзания).

Совместное использование модельных представлений и данных дистанционного микроволнового зондирования позволяет оценить затухание электромагнитных волн в растительном покрове для различных почвенно-растительных формаций [Krapivin et al., 2006].

Для одновременной оценки характеристик почвы и растительности используются комбинированные данные по оптической толщине растительности, альбедо, диэлектрической проницаемости почвы. Синхронные оптические и СВЧ-радиометрические измерения излучательных характеристик подстилающей поверхности позволяют оценить оптическую толщину растительного покрова, зависящую от влажности надземного слоя растительности, и определить влажность почвы. Алгоритм оценки оптической толщины растительного слоя и влажности почвы основан на использовании радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности для двух поляризации, альбедо растительного покрова и диэлект-

рических параметров влажной почвы [Konings et al., 2016].

На основе решения уравнения переноса излучения разработана методика определения влажности почвы и оптической толщины растительного покрова по радиояркостным температурам, измеренным в двух диапазонах длин волн для вертикальной и горизонтальной поляризаций [Сагалович и др., 2005].

В настоящее время оценка глобальных изменений влажности почвы осуществляется по данным спутника SMOS. Установленный на спутнике интерферометр-радиометр MIRAS обеспечивает получение изображений, соответствующих интенсивности собственного излучения поверхности на частоте 1.41 ГГц, откалиброванной в единицах радиояркостных температур. На этой частоте микроволновое излучение подстилающей поверхности зависит от оптической толщины и биомассы растительности, влажности и шероховатости почвы. Учет влияния растительности основан на использовании зависимостей радиояркостных температур почвы от влажности для разных поляризаций и при разных углах зондирования [Parrens et al., 2016].

В данной работе приведены результаты исследований на частоте 1.41 ГГц диэлектрических и радиоизлучательных характеристик ягеля, бриевых мхов, сфагноума, торфа при вариациях объемной влажности и температуры.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Основными характеристиками микроволнового излучения подстилающей поверхности являются радиояркостная температура (T_B) и коэффициент излучения (χ), связанные между собой известным соотношением

$$T_B = \chi T,$$

где $T = 273.15 + t$ [°C] – температура подстилающей поверхности, выраженная в градусах Кельвина. Для описания диэлектрических характеристик используются комплексный показатель преломления $N = \sqrt{\epsilon} = n + ik$ и комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$, связанные формулами

$$\epsilon' = n^2 - k^2, \epsilon'' = 2nk,$$

где n , k – показатели преломления и поглощения; ϵ' , ϵ'' – действительная и мнимая части КДП [Шарков, 2014]. Зависимость χ от n и k определяется формулой [Комаров и др., 1997]

$$\chi = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2}. \quad (1)$$

Измерения диэлектрических характеристик тундровой растительности проводились на лабораторной установке мостового типа с использова-

нием измерителя разности фаз ФК2-18. Измерялись ослабление и сдвиг фазы электромагнитной волны, прошедшей через исследуемый растительный образец, помещенный в измерительный контейнер.

Блок-схема установки приведена на рис. 1. В состав установки входят: Г – генератор сигналов высокочастотный Г4-78 (1.16–1.78 ГГц); ДМС – делитель мощности согласованный; ЛПД – линия переменной длины; А1, А2, А3 – аттенюаторы (согласующие коаксиальные); И – измерительный блок фазометра; А – опорный канал; Б – измерительный канал с контейнером (К) для образца, изготовленным в виде коаксиального волновода.

Процесс измерений заключался в следующем. Сигнал от генератора подавался на ДМС и делился поровну между опорным (А) и измерительным (Б) каналами. При отсутствии в контейнере исследуемого образца устанавливали равное нулю значение разности фаз и амплитуд на фазометре. Затем в контейнер помещали исследуемый образец и по индикатору измерителя ФК2-18 отсчитывали значения разности фаз и ослабление. Установка имела следующие технические характеристики: диапазон однозначных измерений фазы $\pm 180^\circ$; диапазон измерения ослабления от 0 до 60 дБ; погрешность измерений ослабления 0.5 дБ; погрешность измерения фазы 2° . Описание источников возможных погрешностей приведено в работе [Комаров и др., 1997].

Объектами исследования были образцы ягеля, бриевых мхов, сфагноума, торфа, отобранные в Ямало-Ненецком автономном округе.

Для количественного описания содержащейся в образцах влаги использовалась объемная влажность, выраженная в объемных долях и определяемая из соотношения

$$W = (\rho/\rho_w) M_w / M,$$

где ρ , ρ_w – плотности влажного образца и воды; M – масса влажной растительности ($M = M_d + M_w$); M_d , M_w – массы сухой растительности и воды, измеренные на аналитических весах с точностью до 0.001 г. В ходе эксперимента W изменялась высу-

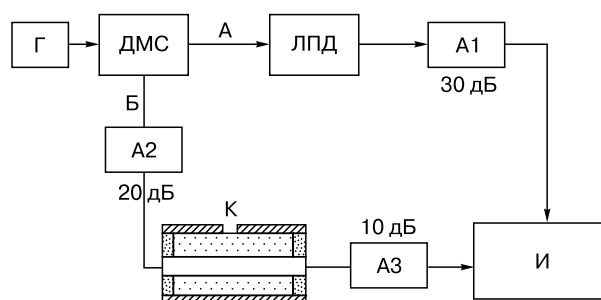


Рис. 1. Схема установки мостового типа на основе измерителя фаз (пояснения в тексте).

шиванием при комнатной температуре при свободном доступе воздуха.

Образцы, в которых в результате нагревания все живые растительные клетки погибли, в дальнейшем использовались для изучения диэлектрических характеристик отмершей растительности. Для этого их повторно увлажняли дистиллированной водой, затем лишнюю воду удаляли, а увлажненные образцы выдерживали в течение нескольких часов под воздухонепроницаемой пленкой для равномерного распределения влаги по всему объему растительного образца.

Экспериментальные исследования зависимостей диэлектрических характеристик растительности от влажности проводились при температуре $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$. Температурные зависимости рассматривались в интервале от -10 до $+25^\circ\text{C}$.

Экспериментальные данные об изменениях диэлектрических характеристик при вариациях температуры и объемной влажности аппроксимировались непрерывными зависимостями с помощью программы Origin 6.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние объемной влажности на диэлектрические свойства растительности

На диэлектрические и радиоизлучательные характеристики тундровой растительности заметное влияние оказывает содержащаяся в растении вода, фазовый состав и диэлектрические свойства которой могут различаться для разных видов растительности, а также для разных элементов растительности одного вида (корни, листья, стебель). При отмирании растительности, образовании пе-

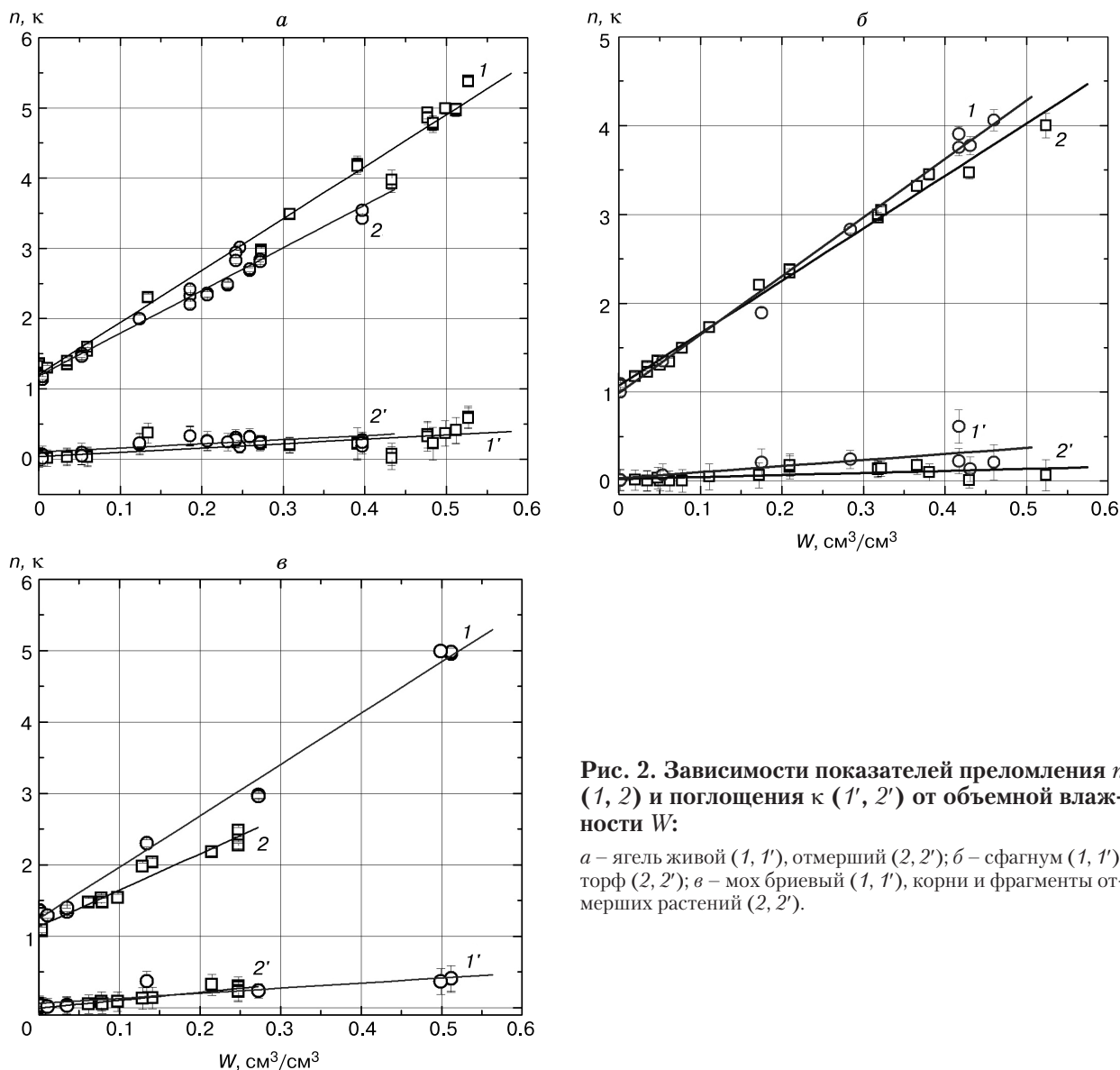


Рис. 2. Зависимости показателей преломления n (1, 2) и поглощения k (1', 2') от объемной влажности W :

а – ягель живой (1, 1'), отмерший (2, 2'); *б* – сфагнум (1, 1'), торф (2, 2'); *в* – мох бривей (1, 1'), корни и фрагменты отмерших растений (2, 2').

Таблица 1. Численные значения коэффициентов A_0, A_1, B_0, B_1 в соотношениях (2), (3)

Вид растительности	A_0	A_1	σ_n	B_0	B_1	σ_κ
Ягель живой	1.20 ± 0.06	7.4 ± 0.17	0.185	0.04 ± 0.03	0.6 ± 0.11	0.125
Ягель отмерший	1.18 ± 0.05	6.1 ± 0.20	0.121	0.10 ± 0.03	0.6 ± 0.13	0.080
Сфагнум	0.99 ± 0.06	6.6 ± 0.21	0.118	0.03 ± 0.067	0.7 ± 0.24	0.136
Торф	1.07 ± 0.03	5.9 ± 0.13	0.086	0.02 ± 0.02	0.23 ± 0.09	0.056
Мох бриевый	1.14 ± 0.07	5.1 ± 0.41	0.110	0.001 ± 0.2	1.1 ± 0.145	0.040
Корневая система	1.25 ± 0.05	7.2 ± 0.19	0.140	0.06 ± 0.03	0.7 ± 0.13	0.096

Примечание. σ_n, σ_κ – среднеквадратические погрешности определения n и κ .

регноя, торфа происходит изменение фазового состава воды и, соответственно, диэлектрических характеристик растительности.

На рис. 2 приведены эмпирические зависимости $n(W)$ и $\kappa(W)$ от объемной влажности для ягеля (*a*), сфагнума (торфяного мха) и торфа (*b*), бриевых мхов и корневой системы с фрагментами отмершей растительности (*в*), аппроксимированные с помощью программы Origin 6.1 прямыми линиями

$$n = A_0 + A_1 W; \quad (2)$$

$$\kappa = B_0 + B_1 W, \quad (3)$$

где A_0, A_1, B_0, B_1 – численные коэффициенты, приведенные в табл. 1.

Из сравнения экспериментальных данных следует, что диэлектрические характеристики высушенной растительности разных видов в пределах погрешности различаются незначительно. Основное различие наблюдается при увеличении влажности. Это может быть связано с различием диэлектрических свойств воды в разных видах растений, изменением фазового состава воды в растениях при их отмирании, различием диэлектрических свойств воды разного фазового состава, присутствующей в живых и погибших растениях.

С использованием соотношений (2), (3) по формуле (1) рассчитывались коэффициенты излучения χ для разных значений W . Зависимости $\chi(W)$ для живого (χ_l) и погибшего (χ_p) ягеля, аппроксимированные прямыми линиями, имеют вид

$$\chi_l = (0.98 \pm 0.006) - (0.846 \pm 0.018)W, \\ \sigma = 0.0195; \quad (4)$$

$$\chi_p = (0.99 \pm 0.007) - (0.82 \pm 0.031)W, \\ \sigma = 0.0179, \quad (5)$$

где σ – среднеквадратические погрешности.

Преобразовав соотношения (4), (5), получим выражения для дистанционного определения объемных влажностей живого и отмершего ягеля:

$$W = (1.18 \pm 0.037) - (1.18 \pm 0.044) \chi_l, \quad \sigma = 0.021;$$

$$W = (1.13 \pm 0.018) - (1.14 \pm 0.023) \chi_p, \quad \sigma = 0.022.$$

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Значительную часть года тундровая растительность находится при отрицательных температурах окружающей среды. В этот период вода, находящаяся вне растений и не связанная сорбционными силами с их поверхностью, замерзает, обращаясь в лед. В то же время вода, находящаяся в самих растениях, может оставаться в разных количествах в незамерзшем состоянии при очень низких температурах (до -75°C) [Бордонский и др., 2008; Бордонский, 2013].

На рис. 3 приведены графики зависимостей $n(t)$ и $\kappa(t)$ для ягеля, сфагнума и торфа, аппроксимированные сигмоидными функциями, имеющими следующий вид:

$$n = n_2 + (n_1 - n_2) \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right)^{-1}; \quad (6)$$

$$\kappa = \kappa_2 + (\kappa_1 - \kappa_2) \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $n_1, n_2, \kappa_1, \kappa_2$ – начальные и конечные значения показателей преломления и поглощения соответственно; t_0 – средняя температура; dt – ширина фазового перехода.

Численные значения величин, входящих в формулы (6), (7), для разных типов живой и отмершей растительности приведены в табл. 2.

На рис. 3, *a* приведены зависимости показателей преломления (кривые 1, 2) и поглощения (кривые 1', 2') живого и отмершего ягеля от температуры в диапазоне от -12 до $+20^\circ\text{C}$. Для измерений использовался один и тот же образец ягеля, имевший до высушивания объемную влажность $W = 0.4$, после высушивания повторно увлажненный до $W = 0.15$.

Видно, что во всем интервале измеренных температур наблюдаются не только количественные, но и качественные различия зависимостей $n(t)$ и $\kappa(t)$, заключающиеся в разной ширине фазовых переходов. Для отмершего ягеля значения n и κ при повышении температуры изменяются скачкообразно, а для живого растения фазовый пере-

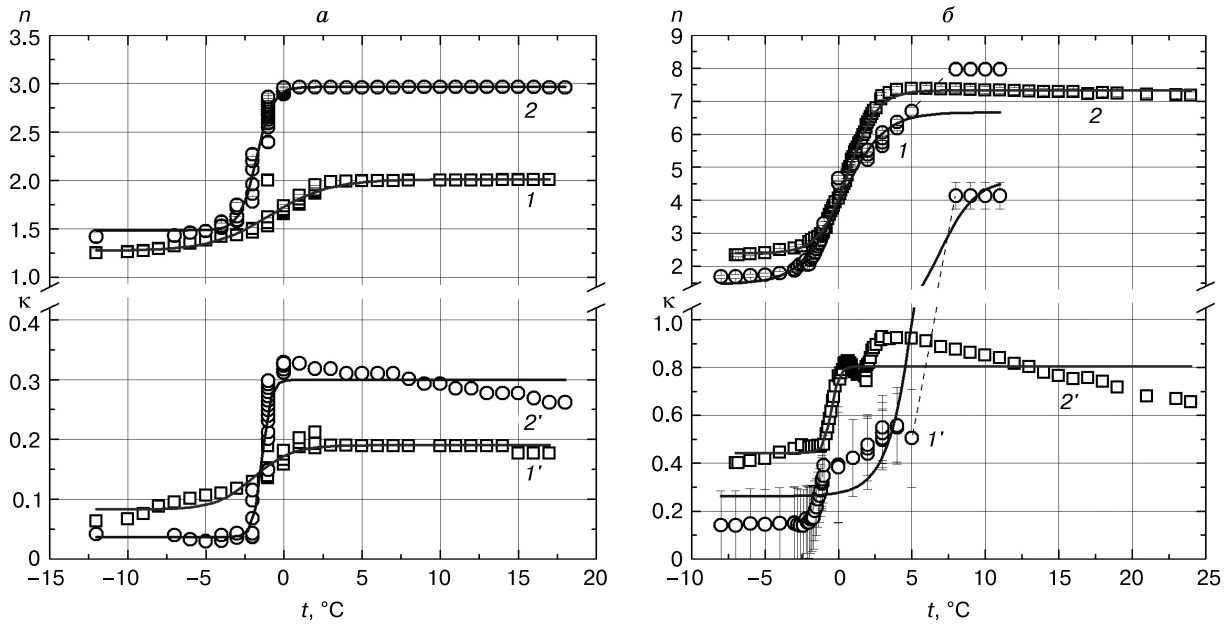


Рис. 3. Зависимости показателей преломления n (1, 2) и поглощения κ (1', 2') от температуры t :
a – ягель живой (1, 1'), отмерший (2, 2'); *б* – сфагнум (1, 1'), торф (2, 2').

ход плавный, что может быть обусловлено замерзанием связанной воды в некотором диапазоне температур ниже 0 °С.

В интервале положительных температур значения n и κ отмершего ягеля намного превышают n и κ живого ягеля. Так как объемная влажность живого ягеля значительно выше объемной влажности отмершего ягеля, то подобное поведение диэлектрических свойств может быть обусловлено различием фазового состава воды в живом и отмершем ягеле, в частности, большей долей связанной воды и меньшей долей свободной воды, содержащейся в живом ягеле по сравнению с отмершим. В ягеле, представляющем собой симбиотическую ассоциацию грибов и микроскопических водорос-

лей, при нагревании разрушается внутренняя структура микроводоросли. В результате этого вода, содержащаяся внутри микроводоросли или в ее клеточной мембране и относящаяся по фазовому составу к категории связанной воды, переходит в категорию свободной воды, значения n и κ которой заметно выше n и κ связанной воды.

Существенные различия диэлектрических характеристик наблюдаются для сфагнума и торфа. На рис. 3, б видно, что для сфагнума на зависимости $\kappa(t)$ (кривая 1') имеется два интервала температур (-2...-1 и 5...8 °С), в которых происходит резкое (скачкообразное) изменение поведения диэлектрических свойств сфагнума. Это может быть связано с особенностями внутреннего строения

Таблица 2. Численные значения величин в формулах (6), (7)

Образец	n_1	n_2	t_0	dt	σ_n
Ягель живой	1.27 ± 0.02	2.01 ± 0.016	-0.87 ± 0.23	1.88 ± 0.22	1.88
Ягель отмерший	1.49 ± 0.017	2.97 ± 0.009	-1.77 ± 0.03	0.52 ± 0.02	3.85
Сфагнум	1.46 ± 0.028	6.66 ± 0.05	0.21 ± 0.05	1.41 ± 0.03	2.7
Торф	2.39 ± 0.02	7.33 ± 0.02	0.67 ± 0.018	0.98 ± 0.016	1.0
Образец	κ_1	κ_2	t_0	dt	σ_κ
Ягель живой	0.08 ± 0.005	0.19 ± 0.003	-1.92 ± 0.29	1.20 ± 0.24	0.001
Ягель отмерший	0.037 ± 0.007	0.30 ± 0.006	-1.4 ± 0.07	0.28 ± 0.04	0.007
Сфагнум	0.26 ± 0.24	4.63 ± 0.4	6.9 ± 0.53	1.21 ± 0.03	0.82
Торф	0.44 ± 0.04	0.81 ± 0.03	-0.48 ± 0.2	0.26 ± 0.2	0.06

Примечание. n_1, n_2 – начальное и конечное значения показателя преломления; κ_1, κ_2 – начальное и конечное значения показателя поглощения; t_0 – средняя температура; dt – ширина фазового перехода; σ_n, σ_κ – среднеквадратические погрешности показателей преломления и поглощения.

сфагнома, в частности, с существованием пустых полостей, в которых может накапливаться вода в количестве, многократно превышающем массу самого растения.

В интервале температур от -8 до -2 °C часть воды находится в виде льда вне растения. При его таянии образуется свободная вода с высокими значениями n и k , что обуславливает резкий рост величины k . Возрастание k в диапазоне температур от -2 до $+5$ °C может быть вызвано постепенным таянием льда, образовавшегося в пустотелых клетках сфагнома и окруженного клеточной мембраной. Таяние льда в этих клетках происходит с задержкой по сравнению со льдом, находящимся вне растения. В интервале от $+5$ до $+12$ °C диэлектрические характеристики сфагнома близки к диэлектрическим характеристикам пресной воды.

С использованием экспериментальных данных по формуле (1) были рассчитаны коэффициенты излучения для ягеля, сфагнома, торфа. Зависимости коэффициентов излучения от температуры в диапазоне $-12...+20$ °C, приведенные на рис. 4, аппроксимировались сигмоидной функцией, имеющей вид

$$\chi = \frac{\chi_1 - \chi_2}{1 + \exp\left[\frac{t - t_0}{dt}\right]} + \chi_2, \quad (8)$$

где χ_1 , χ_2 – начальное и конечное значения коэффициентов излучения; t_0 – средняя температура; dt – ширина фазового перехода.

Численные значения величин, входящих в формулу (8), для разных типов растительности приведены в табл. 3.

Таблица 3. Численные значения величин, входящих в соотношение (8)

Образец	χ_1	χ_2	t_0	dt	σ
Ягель живой	0.98 ± 0.002	0.89 ± 0.001	-0.35 ± 0.13	1.39 ± 0.12	0.0003
Ягель отмерший	0.96 ± 0.004	0.75 ± 0.003	-1.74 ± 0.05	0.49 ± 0.04	0.0002
Сфагнум	0.93 ± 0.011	0.49 ± 0.008	-0.98 ± 0.06	0.60 ± 0.07	0.0008
Торф	0.82 ± 0.003	0.42 ± 0.002	0.005 ± 0.03	0.97 ± 0.02	0.0005

Примечание. χ_1 , χ_2 – начальное и конечное значения коэффициента излучения; t_0 – средняя температура; dt – ширина фазового перехода; σ – среднеквадратическая погрешность.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены линейные зависимости показателей преломления и поглощения от объемной влажности для ягеля, сфагнома, торфа, бриевых мхов, корней и фрагментов отмерших растений.

Для ягеля, сфагнома и торфа зависимости показателей преломления и поглощения от температуры в интервале от -10 до $+20$ °C аппроксимированы сигмоидальной функцией. Установлено, что

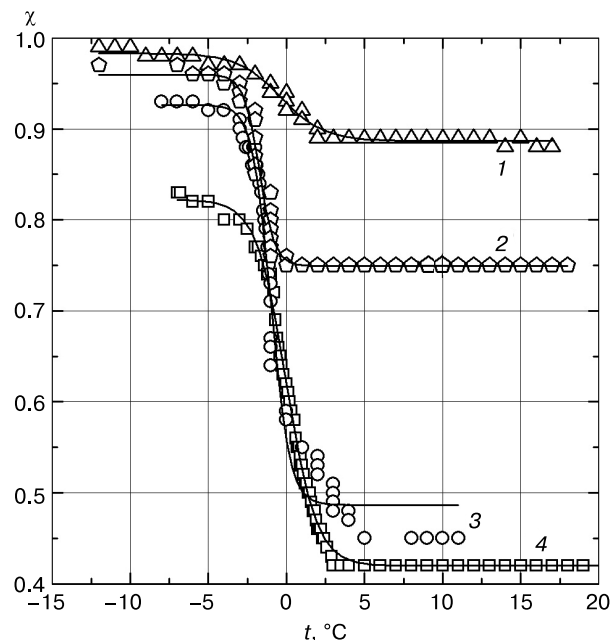


Рис. 4. Зависимости коэффициентов излучения живого (1) и отмершего ягеля (2), сфагнома (3) и торфа (4) от температуры.

В полученном выражении (8) величины t_0 , dt , χ_1 , χ_2 характеризуют радиоизлучательные свойства разных видов растительности и могут быть измерены в лабораторных условиях. Значения χ и t можно определить контактным способом или по данным дистанционного зондирования в микроволновом и инфракрасном диапазонах.

наибольшие изменения наблюдаются в диапазоне интенсивных фазовых переходов вода–лед.

Выявлено, что показатели преломления и поглощения живой и отмершей растительности различаются, что может быть связано с различием фазового состава воды в живой и отмершей растительных клетках.

Диэлектрические и радиоизлучательные параметры растительности могут выступать как индикаторы деградации растительного покрова тундры. Установленные зависимости могут быть

использованы при моделировании радиоизлучательных характеристик тундровой растительности и оценке вклада растительного покрова в суммарное микроволновое излучение подстилающей поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-05-05018, региональный грант (РФФИ-ЯНАО) № 16-45-890664), Некоммерческого партнерства “Межрегиональный экспедиционный центр “Арктика” (соглашение № 10-Э от 13.07.2015).

Литература

- Аммосова Е.В., Черосов М.М., Николин Е.Г., Троева Е.И.** Применение ГИС-технологий для уточнения контуров мелкомасштабной карты растительности Якутии и островов Северного Ледовитого океана // Науч. ведомости Белгород. гос. ун-та. Сер. Естеств. науки, 2011, т. 15, № 9–1 (104), с. 117–123.
- Ammosova, E.V., Cherosov, M.M., Nikolin, E.G., Troyeva, E.I., 2011. Application of the GIS technologies to verifying the contours of a small-scale map of the vegetation of Yakutia and of the Arctic Ocean islands. Proceedings of the Belgorod State University, sciences series, vol. 15, No. 9–1 (104), 117–123.
- Блохин Д.Ю., Незамов В.И.** Оценка продуктивности пастбищ на землях лесного фонда при помощи материалов дистанционного зондирования земли // Вестн. Краснояр. гос. аграрного ун-та, 2010, № 5, с. 24–27.
- Blokhin, D.Yu., Nezamov, V.I., 2010. Assessment of pasture productivity on the lands of the forest reserves by using remote sensing materials. Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University, No. 5, 24–27.
- Бондур В.Г.** Технологии оценки состояния и динамики растительных ресурсов наземных экосистем на основе дистанционного мониторинга / М-во образования и науки РФ: Отчет о НИР № 02.525.11.5005 от 08.10.2007.
- Bondur, V.G., 2007. The technologies of assessing the condition and dynamics of the vegetative resources of the land ecosystems on the basis of remote monitoring. R&D Report No. 02.525.11.5005, 08.10.2007 (Ministry of Education and Science of RF).
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Кутузов А.В.** Разработка научно-технических основ и методов аэрокосмического мониторинга в интересах рационального природопользования и обеспечения экологической безопасности арктической зоны Российской Федерации / М-во образования и науки РФ: Отчет о НИР № 14.515.11.0003 от 10.01.2012.
- Bondur, V.G., Vorobyev, V.E., Zamshin, V.V., Kutuzov, A.V., 2012. Development of the scientific and technological foundations and methods of aerial and satellite monitoring in the interests rational nature use of ensuring the environmental safety of the Arctic zone of the Russian Federation. R&D Report No. 14.515.11.0003, 10.01.2012 (Ministry of Education and Science of RF).
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.** Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2008, № 6, с. 64–73.
- Bondur, V.G., Chimitdorzhiev, T.N., 2008. Remote sensing of vegetation with optical and microwave methods. Bulletin of higher educational institutions. Geodesy and aerial survey, No. 6, 64–73.
- Бордонский Г.С.** Изучение особенностей фазовых переходов воды в древесине сосны при одновременных диэлектрических и калориметрических измерениях // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 26–31.
- Bordonskiy, G.S., 2013. Study of the water phase transition in pine wood at simultaneous dielectric and calorimetric measurements. Earth's Cryosphere, XVII (2), 26–31. (in Russian)
- Бордонский Г.С., Орлов А.О., Филиппова Т.Г.** Измерения низкочастотной диэлектрической проницаемости увлажненных дисперсных сред при отрицательных температурах // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 66–71.
- Bordonskiy, G.S., Orlov, A.O., Filippova, T.G., 2008. Measurements of low frequency dielectric permittivity for moistened dispersed media at negative temperatures. Earth's Cryosphere, XII (1), 66–71. (in Russian)
- Васильевская В.Д., Григорьев В.Я., Погожева Е.А.** Взаимосвязи характеристик почвенно-растительного покрова тундр как основа показателей его устойчивости, деградации и восстановления // Почвоведение, 2006, № 3, с. 352–362.
- Vasilyevskaya, V.D., Grigoryev, V.Ya., Pogozheva, E.A., 2006. Interactions among the characteristics of the soil and vegetation cover of tundras as a basis for its sustainability, degradation and recovery parameters. Pochvovedeniye, No. 3, 352–362.
- Головатин М.Г., Морозова Л.М., Пасхальный С.П., Эктова С.Н.** Изменение растительности и животного населения в тундрах Ямала под действием интенсивного выпаса домашних оленей // Аграрный науч. журн., 2008, № 9, с. 13–18.
- Golovatin, M.G., Morozova, L.M., Paskhalny, S.P., Ektova, S.N., 2008. Changes in the vegetation and animal population of the Yamal tundras under the impact of intense pasturing of reindeer. Agrarny Nauchny Zhurnal, No. 9, 13–18.
- Григорьев В.Я., Васильевская В.Д., Погожева Е.А.** Оценка и прогноз экологического состояния почвенно-растительного покрова на нарушенных территориях тундр // Почвоведение, 2011, № 3, с. 373–383.
- Grigoryev, V.Ya., Vasilyevskaya, V.D., Pogozheva, E.A., 2011. Assessment and forecast of the environmental condition of the vegetation and soil cover on disturbed territories of the tundras. Pochvovedeniye, No. 3, 373–383.
- Добрецов Н.Н., Зольников И.Д., Королюк А.Ю. и др.** Разработка системы комплексного описания полигонов для интерпретации данных космической съемки // Сиб. эколог. журн., 2005, т. 12, № 6, с. 1031–1038.
- Dobretsov, N.N., Zolnikov, I.D., Korolyuk, A.Yu., et al., 2005. Development of a system of comprehensive description of snow patches for interpreting the satellite survey data. Sibirsky Ekologichesky Zhurnal, 12 (6), 1031–1038.
- Жилинская Г.Н.** Определение диэлектрической проницаемости земных покровов при наличии растительности методами микроволновой радиометрии // Науч. вестн. Моск. гос. техн. ун-та граждан. авиации, 2006, № 98, с. 159–162.
- Zhilinskaya, G.N., 2006. Determining the dielectric permittivity of the Earth covers in the presence of vegetation by the methods of microwave radiometry. The bulletin of the Moscow State Aviation University, No. 98, 159–162.
- Зольников И.Д., Лямина В.А., Королюк А.Ю.** Комплексная технология картографирования и мониторинга гетерогенного растительного покрова // География и природ. ресурсы, 2010, № 2, с. 126–131.
- Zolnikov, I.D., Lyamina, V.A., Korolyuk, A.Yu., 2010. The complex technology of mapping and monitoring of the heterogeneous vegetative cover. Geografia i Prirodnye Resursy, No. 2, 126–131.
- Колосов Д.Ф., Калашников А.В.** Деградация почвенно-растительного покрова в районах нефтегазоразведочных работ на территории юго-восточной части Большеземельской

- тундры // Защита окружающей среды в нефтегаз. комплексе, 2013, № 9, с. 9–13.
- Kolosov, D.F., Kalashnikov, A.V., 2013. Degradation of the soil and vegetation cover in the areas of oil and gas exploration works in the eastern territory of the Bolshezemelskaya tundra. Environmental Protection in the Oil and Gas Complex, No. 9, 9–13.
- Комаров С.А., Миронов В.Л., Романов А.Н.** Аэрокосмическое зондирование гидрологического состояния почв радиофизическими методами. Барнаул, Изд-во АГУ, 1997, 101 с.
- Komarov, S.A., Mironov, V.L., Romanov, A.N., 1997. Aerial and Satellite Survey of the Hydrologic Condition of Soils by Radio-physical Methods. Altai University Press, Barnaul, 101 pp. (in Russian)
- Корниенко С.Г.** Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природ. ресурсы, 2011, № 1, с. 67–73.
- Kornienko, S.G., 2011. Evaluation of transformations of natural landscapes of the Tazovsky Peninsula by satellite survey data. Geografiya i Prirodnye Resursy, No. 1, 67–73.
- Корниенко С.Г., Хренов Н.Н., Василенко П.А.** Развитие научных основ аэрокосмического геоэкологического мониторинга и обеспечения безопасности геотехнических объектов при освоении нефтегазовых месторождений Арктики и Субарктики // Георесурсы, геознергетика, геополитика, 2013, № 1 (7), с. 15.
- Kornienko, S.G., Khrenov, N.N., Vasilenko, P.A., 2013. Development of the scientific foundations of aerial and satellite geoenvironmental monitoring and of ensuring the safety of geotechnical structures during development of oil and gas fields of Arctic and Subarctic. Georesursy, Geoenergetika, Geopolitika, No. 1 (7), 15.
- Корниенко С.Г., Якубсон К.И., Масленников В.В.** Изучение трансформаций природных комплексов нефтегазоносных областей криолитозоны по данным космической съемки // Наука и техника в газовой пром-сти, 2005, № 3, с. 71–77.
- Kornienko, S.G., Yakubson, K.I., Maslennikov, V.V., 2005. A study of transformations of nature complexes of the oil and gas-bearing areas of the permafrost zone according to satellite survey data. Nauka i Tekhnika v Gazovoy Promyshlennosti, No. 3, 71–77.
- Кряжмский Ф.В., Маклаков К.В., Морозова Л.М., Эктова С.Н.** Системный анализ биоценозов полуострова Ямал: имитационное моделирование воздействия крупностадного оленеводства на растительный покров // Экология, 2011, № 5, с. 323–333.
- Kryazhinsky, F.V., Maklakov, K.V., Morozova, L.M., Ektova, S.N., 2011. Systemic analysis of biocenoses of the Yamal Peninsula: simulation of the impact of large-scale reindeer herding on the vegetative cover. Ekologiya, No. 5, 323–333.
- Мачулина Н.Ю.** Сравнительная оценка экосистемных свойств почв южной криолитозоны Большеземельской тундры // Пробл. регион. экологии, 2014, № 5, с. 77–82.
- Machulina, N.Y., 2014. Comparative evaluation of the ecosystem properties of the soils of the southern permafrost zone of the Bolshezemelskaya tundra. Problemy Regionalnoy Ekologii, No. 5, 77–82.
- Москаленко Н.Г.** Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 18–23.
- Moskalenko, N.G., 2009. Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis. Earth's Cryosphere, XIII (4), 18–23. (in Russian)
- Московченко Д.В.** Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Экология и природопользование, 2013, № 12, с. 57–66.
- Moskovchenko, D.V., 2013. The specifics of many years' dynamics of the vegetation of the Bovanenkovo oil and gas condensate field (Yamal Peninsula). Bulletin of the Tyumen State University, ecology and nature use, No. 12, 57–66.
- Мурашко О.А., Даллманн В.К.** Трансформации традиционного образа жизни и питания коренного населения Ненецкого автономного округа // Вестн. МГУ. Сер. 23: Антропология, 2011, № 4, с. 4–24.
- Murashko, O.A., Dallmann, V.K., 2011. Transformation of the traditional lifestyle and diet of the indigenous population of the Nenets autonomous district. Bulletin of the Moscow State University, series 23: anthropology, No. 4, 4–24.
- Мурашко О.А., Даллманн В.К.** Трансформации традиционного образа жизни и питания коренного населения Ненецкого автономного округа // Вестн. МГУ. Сер. 23: Антропология, 2011, № 4, с. 4–24.
- Murashko, O.A., Dallmann, V.K., 2011. Transformation of the traditional lifestyle and diet of the indigenous population of the Nenets autonomous district. Bulletin of the Moscow State University, series 23: anthropology, No. 4, 4–24.
- Пейль К.В.** Ландшафтное картографирование северной части тундры полуострова Ямал на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна: Материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Н.К. Байбакова. Тюмень, Тюм. гос. нефтегаз. ун-т, 2011, с. 387–390.
- Peyl, K.V., 2011. Landscape mapping of the northern part of the tundra of the Yamal Peninsula on the basis of interpreting remote sensing data, in: Geology and the Oil and Gas Content of the West-Siberian Megabasin. Proceedings of the All-Russia scientific and technical conference dedicated to the centenary of Nikolay Baibakov. Tyumen State Oil and Gas University, pp. 387–390. (in Russian)
- Перевалова Е.В.** Интервью с оленеводами Ямала о падеже оленей и перспективах ненецкого оленеводства // Урал. исторический вестн., 2015, № 2 (47), с. 39–49.
- Prevalova, E.V., 2015. An interview with the reindeer herders about the mortality of the reindeer and the prospects of Nenets reindeer herding. The Ural History Herald, No. 2 (47), 39–49.
- Русанова Г.В.** Деградация криогенных почв в районах нефтегазозведочных работ // Почвоведение, 2000, № 2, с. 255–261.
- Rusanova, G.V., 2000. Degradation of permafrost soils in the areas of oil and gas exploration works. Pochvovedenie, No. 2, 255–261.
- Сагалович В.Н., Фальков Э.Я., Царева Т.И.** Оценивание содержания воды в растительности по гиперспектральным вегетационным индексам // Исслед. Земли из космоса, 2004, № 1, с. 63–66.
- Sagalovich, V.N., Falkov, E.Y., Tsareva, T.I., 2004. Evaluating the content of water in vegetation by hyperspectral vegetation indices. Exploring the Earth from Outer Space, No. 1, 63–66.
- Сагалович В.Н., Фальков Э.Я., Царева Т.И.** Определение влажности почвы и оптической толщины растительного покрова по данным пассивного микроволнового дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса, 2005, № 5, с. 44–47.
- Sagalovich, V.N., Falkov, E.Y., Tsareva, T.I., 2005. Determining the moisture content in soil and the optical thickness of the vegetative cover by the data of passive remote microwave sensing. Exploring the Earth from Outer Space, No. 5, 44–47.
- Способ** определения параметров состояния почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального аэрокосмического зондирования: пат. RUS 2424540 / Дмитриев Е.В., Козодеров В.В. Опубл. 06.10.2009.
- Dmitriev, E.V., Kozoderov, V.V., 2009. A method of determining the parameters of the soil and vegetation cover according to multispectral aerial survey data, patent RUS 2424540, 06.10.2009.

Телятников М.Ю., Пристяжнюк С.А. Негативное воздействие воздушных выбросов предприятий г. Норильска на растительность лесотундры // *Turczaninowia*, 2006, т. 9, № 4, с. 93–111.

Telyatnikov, M.Y., Pristyazhnyuk, S.A., 2006. Negative impact of industrial emissions of production facilities of Norilsk on the vegetation and forest tundra. *Turczaninowia* 9 (4), 93–111.

Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: В 2 т. М., ИКИ РАН, 2014, т. 1, 544 с.

Sharkov, E.A., 2014. Radiothermal Remote Sensing of the Earth: the Physical Basics, in 2 volumes, vol. 1. Space Research Institute, Moscow, 544 pp. (in Russian)

Buchkina, N.P., Zuyev, V.S., Balashov, E.V. Effects of tracked vehicles on the morphological and physical properties of tundra soils // *Soil and Tillage Res.*, 1998, vol. 48, No. 4, p. 317–324.

Evans, R. Soil erosion in the UK initiated by grazing animals: A need for a national survey // *Applied Geography*, 1997, vol. 17, No. 2, p. 127–141.

Forbes, B.C., Jefferies, R.L. Revegetation of disturbed arctic sites: constraints and applications // *Biolog. Conservation*, 1999, vol. 88, No. 1, p. 15–24.

Kashulina, G., Reimann, C., Finne, T.E., Halleraker, J.H., Åyräs, M., Chekushin, V.A. The state of the ecosystems in the central Barents Region: scale, factors and mechanism of disturbance // *Science of the Total Environ.*, 1997, vol. 206, No. 2–3, p. 203–225.

Konings, A.G., Piles, M., Rötzer, K., et al. Vegetation optical depth and scattering albedo retrieval using time series of dual-polarized L-band radiometer observations // *Remote Sensing of Environ.*, 2016, vol. 172, p. 178–189.

Kozak, K., Polkowska, Z., Ruman, M., et al. Analytical studies on the environmental state of the Svalbard Archipelago

provide a critical source of information about anthropogenic global impact // *TrAC Trends in Analyt. Chemistry*, 2013, vol. 50, p. 107–126.

Krapivin, V.F., Shutko, A.M., Chukhlantsev, A.A., et al. GIMS-based method for vegetation microwave monitoring // *Environ. Modelling and Software*, 2006, vol. 21, No. 3, p. 330–345.

Oostdam, J. Van, Donaldson, S.G., Feeley, M., et al. Human health implications of environmental contaminants in Arctic Canada: A review // *Science of the Total Environ.*, 2005, vol. 351–352, p. 165–246.

Parrens, M., Wigneron, J.-P., Richaume, P., et al. Global-scale surface roughness effects at L-band as estimated from SMOS observations // *Remote Sensing of Environ.*, 2016, vol. 181, p. 122–136.

Raynolds, M.K., Comiso, J.C., Walker, D.A., Verbyla, D. Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI // *Remote Sensing of Environ.*, 2008, vol. 112, No. 4, p. 1884–1894.

Rickbeil, G.J.M., Coops, N.C., Adamczewski, J. The grazing impacts of four barren ground caribou herds (*Rangifer tarandus groenlandicus*) on their summer ranges: An application of archived remotely sensed vegetation productivity data // *Remote Sensing of Environ.*, 2015, vol. 164, p. 314–323.

Tutubalina, O.V., Rees, W.G. Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Noril'sk (1961–1999) // *Cold Regions Sci. and Technol.*, 2001, vol. 32, No. 2–3, p. 191–203.

Virtanen, T., Mikkola, K., Patova, E., Nikula, A. Satellite image analysis of human caused changes in the tundra vegetation around the city of Vorkuta, north-European Russia // *Environ. Pollution*, 2002, vol. 120, No. 3, p. 647–658.

*Поступила в редакцию
29 марта 2016 г.*