

Сезонные различия диэлектрических и радиоизлучательных характеристик карликовых пород древесной тундровой растительности в микроволновом диапазоне

Романов А.Н., д.т.н., зав. лаб. Атмосферно-гидросферных процессов, ИВЭП СО РАН, Уланов П.Н., ст. пр., Алтайский государственный университет

Введение

В последние десятилетия наблюдается заметная деградация растительного покрова планеты, связанная с изменением видового состава растительных сообществ, исчезновением отдельных видов растительности, антропогенным воздействием. Изменение растительного покрова Земли оказывает существенное влияние на биофизические свойства подстилающей поверхности и, в конечном счете, на микроклимат территории. В зависимости от конкретного вида растительности и фонового климата результирующие конкурирующие биофизические процессы могут усиливать эффекты потепления или похолодания.

Проблема деградации растительного покрова особенно актуальна для северных стран Европы, а также арктических территорий, значительную часть которых занимает тундра. Растительный покров тундры является одним из наиболее важных факторов, регулирующих скорость деградации вечной мерзлоты в тундре и лесотундре путем изменения амплитуды и продолжительности циклов суточного замораживания/оттаивания почвенного покрова, времени сезонного оттаивания почвенного слоя. Деградация растительности ведет к усилению последствий изменения климата на территориях с вечной мерзлотой. Наиболее сильные изменения арктических экосистем связаны с расширением площадей тундровых кустарников, карликовых пород деревьев, изменением количества и объема оттаивающих озер.

Площади, занимаемые тундрой, составляют десятки и сотни тысяч квадратных километров. Действительный контроль негативных изменений, происходящих с растительным покровом тундры на таких больших площадях, возможен с использованием методов дистанционного зондирования. Для изучения состояния и свойств растительности тундры широко используются данные спутникового зондирования в видимом и инфракрасном диапазонах, позволяющие оценивать тип и биомассу растительности. В последние годы для оценки растительности используются спутниковые изображения, полученные в оптическом и микроволновом диапазонах, разработан алгоритм расчета параметров растительности с помощью датчиков AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), установленных на борту спутников MetOp.

Радиоизлучательные характеристики растительности в микроволновом диапазоне зависят от состояния растительности, ее оптической толщины. В свою очередь оптическая толщина растительности зависит от биомассы и влажности. Дистанционная оценка оптической толщины растительного покрова основана на интерпретации спутниковых данных в L-, X-, C-диапазонах с помощью активных и пассивных СВЧ-датчиков ASCAT, SMOS, AMSR-E. Изменчивость радиоизлучательных характеристик в L-диапазоне связана с различием физических свойств растительного покрова и влажности почвы. Для количественной оценки динамики происходящих изменений растительного покрова используются данные спутников JERS-1, ALOS-2, PALSAR-2. Разработан алгоритм определения скин-слоя растительности и влажности почвы, основанный на использовании временных рядов радиометрических наблюдений на двух поляризациях в L-диапазоне, вместе с измерением альbedo рассеяния. Для количественной оценки свойств растительности и влажности почвы используются данные поляриметрических измерений радиолокаторов с синтезированной апертурой (SAR) в C-диапазоне, зависящие от влажности и шероховатости подстилающей поверхности, а также от соотношения площадей, занятых разными типами растительности. Чувствительность радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности зависит от конфигурации датчика, влажности почвы, площади покрытия и структуры лесного покрова. В редком лесу, состоящем из зрелых деревьев, мониторинг подстилающей поверхности возможен только при очень влажных почвенных условиях. Подробный обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований дистанционного микроволнового мониторинга лесов приведен в работе.

Известно, что микроволновое излучение подстилающей поверхности с древесной растительностью в зимний и летний периоды различается. На основе использования разновременные спутниковых данных SSM/I установлено, что в зимний период лесной покров и заснеженный грунт оказывают доминирующее влияние на радиоизлучательные характеристики подстилающей поверхности в зимних условиях в бореальной лесной зоне. На основе летних и зимних экспериментов в диапазонах L установлено линейная зависимость между радиояркостью температуры, измеренной на вертикальной и горизонтальной поляризациях, и биомассой леса. Сезонный переход от отрицательных температур окружающей среды к положительным температурам, оказывающий влияние на многие экосистемные процессы, происходящие в бореальных лесах, сопровождается резким изменением диэлектрических и радиоизлучательных свойств подстилающей поверхности, связанных с таянием снега и льда, может быть зафиксирован по ежедневным данным обратного рассеяния радара NSCAT.

Растительный покров оказывает заметное влияние на радиояркость температуру подстилающей поверхности в результате собственного теплового излучения, а также поглощения, рассеяния, перерождения ее микроволнового излучения. Ослабление растительностью микроволнового излучения подстилающей поверхности, зависящее от оптической толщины растительного слоя, является радиофизическим критерием, используемым для оценки изменений растительного покрова. Значительным потенциалом для дистанционной оценки свойств растительности обладает спутник SMAP (Soil Moisture Active Passive). На основе данных SMAP разработан многомерный двухканальный алгоритм оценки глобальной оптической толщины растительности, влажности почвы и альbedo рассеяния. Установлено соответствие значений оптической толщины растительности, рассчитанных по данным SMAP и SMOS.

Радиояркость температура подстилающей поверхности, определяемая со спутника SMAP, зависит от свойств растительности, физической температуры и влажности почвы, шероховатости поверхности и различается для мерзлых и талых почв. Алгоритм определения влажности почвы по данным спутника SMAP основан на использовании модели микроволнового излучения подстилающей поверхности, учитывающей шероховатость поверхности, и модели комплексной диэлектрической проницаемости мерзлой и незамерзшей почв.

С использованием данных спутника SMOS исследованы радиоизлучательные характеристики микроволнового излучения бореальных хвойных лесов при различных условиях увлажненности, с учетом физических свойств лесной подстилки и почвы. На этой основе разработан радиометрический метод определения температуры подстилающей поверхности, апробированный для бореальных лесов и арктической тундры. Показано, что сезонные вариации микроволнового излучения зависят от свойств ландшафтов, в том числе от наличия и площади участков открытой воды, типа растительности, сезонной фенологии, толщины и плотности снежного покрова, наличия ледовых прослоек, образующихся при замораживании и оттаивания. Параметры древесной растительности учитываются при дистанционной оценке толщины снежного покрова. Проведены расчеты излучательной способности бореальных лесов и почвенного покрова на частотах 24, 50, 89 и 157 ГГц на разных углах зондирования и разных поляризациях. Выявлены различия между радиоизлучательными характеристиками участков с лесом и без леса.

Разработана эффективная методика мониторинга лесов, используемая для их типизации, оценки древесной биомассы, в некоторых случаях, оценки физических свойств почвы под пологом леса. Выявлены сезонные изменения радиоизлучательных характеристик в обратном рассеянии радара из смешанных хвойных и лиственных пород. Разработан методологический подход к оценке затухания электромагнитных волн в растительном покрове на примере различных почвенно-растительных формирований. Диэлектрические свойства древесины в значительной мере зависят от ее плотности и структурной анизотропии, влажности и фазового состава воды в древесной ткани. Исследовано влияние окружающей среды на диэлектрические свойства древесины. На основе лабораторных измерений резонаторным методом в диапазоне 3-12 ГГц диэлектрической проницаемости хвойных пород (ель, сосна, кедр, пихта) выявлено их отличие от диэлектрических свойств древесины лиственных деревьев. Изучено влияние влажности на диэлектрические свойства древесины. Разработан метод микроволновой томографии древесных материалов, основанный на использовании антенн, находящихся в контакте с древесным образцом. Разработана модель комплексной диэлектрической проницаемости растительности в частотном диапазоне 0.3-18 ГГц при 22°C и объемной влажности от 12% до 73%.

Значительное влияние на микроволновое излучение подстилающей поверхности тундры оказывают заросли кустарников и древесной растительности, в первую очередь, березы карликовой (*Betula nana*) и ивы (*Salix*), нередко образующих сплошные заросли в тундре. В зависимости от биомассы и влажности растительности, занимаемой площади, древесная растительность может полностью экранировать микроволновое излучение нижележащей мерзлой или сезонно-талой почвы. Важным вопросом, возникающим при интерпретации данных дистанционного зондирования тундры, является вопрос сезонных изменений диэлектрических и радиоизлучательных характеристик древесной растительности. В данной работе приведены результаты исследований диэлектрических и радиоизлучательных характеристик березы карликовой и ивы на частоте 1.41 ГГц.

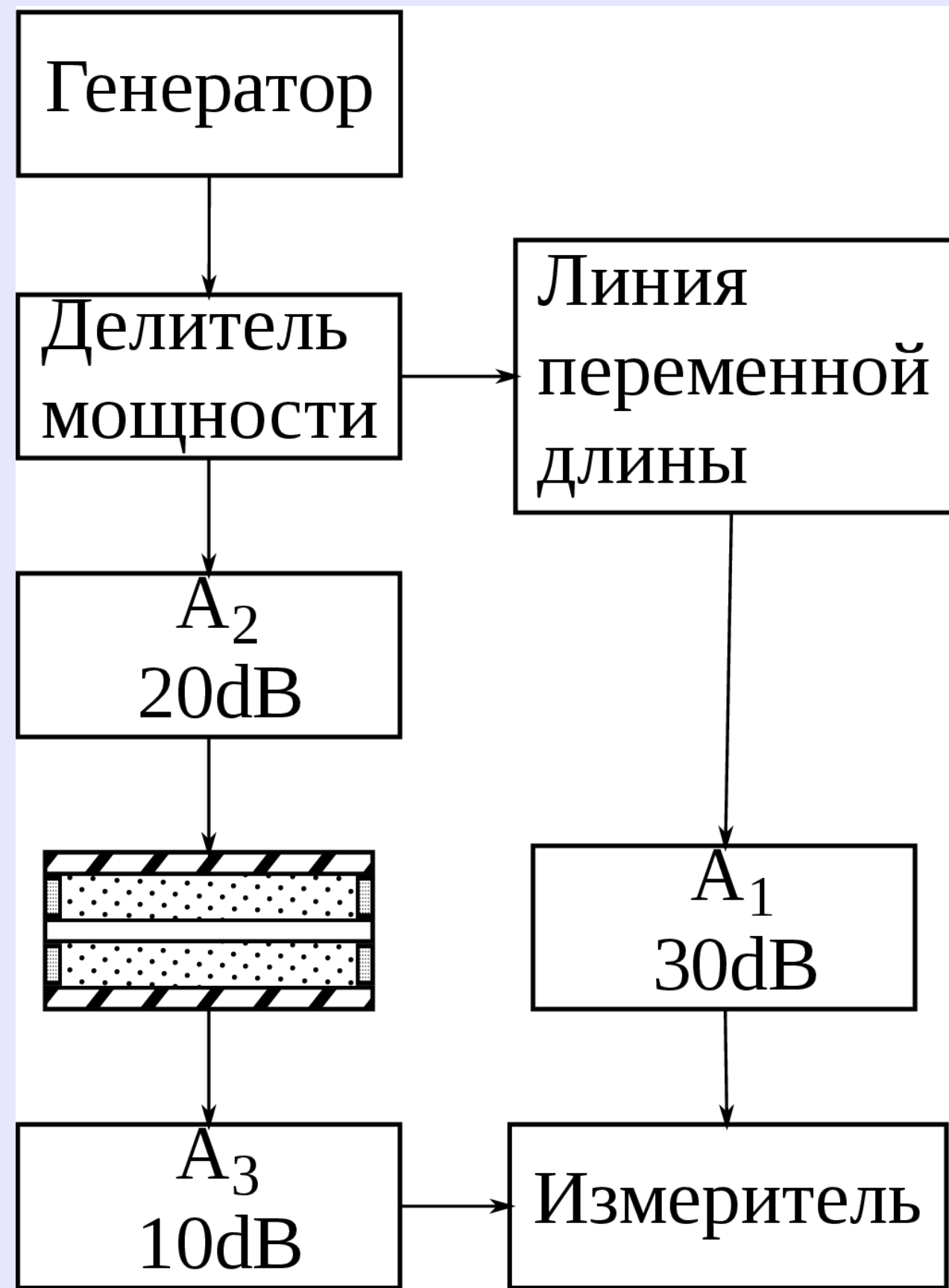


Fig. 1 Схема измерительной установки

Процесс измерений заключался в следующем. С помощью ДМ производилась балансировка мостовой схемы, в плечо которой устанавливался пустой эталонный контейнер. Сигнал от генератора подавался на ДМ и делился поровну опорным и измерительным каналами. В начале измерений, при отсутствии в контейнере исследуемого образца, устанавливалось нулевое значение разности фаз и амплитуд на фазометре. Затем в контейнер помещался образец, и по индикатору измерителя ФК2-18 отсчитывались значения разности фаз и затухания. Согласно паспортным данным ФК2-18, диапазон однозначных измерений фазы – ±180°; диапазон измерения ослабления – от 0 до 60 дБ; погрешности измерения ослабления и фазы составляли 0.2 дБ и 0.2°. Это соответствует относительной погрешности для коэффициента излучения не более 7%.

При установлении температурных зависимостей исследуемый образец охлаждали до температуры 265 К, затем измеряли диэлектрические параметры при постепенном повышении температуры до 290 К. Температуру измеряли электронным термометром с погрешностью не более 0.5°C. После диэлектрических измерений образец извлекали из контейнера, взвешивали на аналитических весах с погрешностью не более 0.0001 г, после чего помещали в сушильный шкаф и высушивали до постоянной массы. По измеренным значениям массы влажного и высушенного образцов и известному объему контейнера рассчитывали объемную влажность и плотность образца. Объемную влажность исследуемого образца определяли по формуле

$$W = \frac{V_w}{V} = \frac{\rho}{\rho_w} \frac{M_w}{M} \quad \text{где } V, M, \rho - \text{объем, масса и плотность влажного образца, } V_w, M_w = M - M_{\text{сух}}, \rho_w \approx 1 \text{ г/см}^3 - \text{объем, масса и плотность содержащейся в образце воды, } M_{\text{сух}} - \text{масса сухого образца.}$$

В Ямало-Ненецком автономном округе, в разные сезоны года мы отбирали образцы древесной тундровой растительности с живых не засохших деревьев (ветки диаметром не более 0.5 см, листья в летний период). Для предотвращения высыхания образцы упаковывали в герметичные воздушно-водонепроницаемые целлофановые мешки. Диэлектрические характеристики тундровой растительности измеряли методом мостовых схем, хорошо себя зарекомендовавшим при изучении диэлектрических характеристик древесины. Измерения проводили на лабораторной установке, собранной на базе промышленного измерителя разности фаз и отношения амплитуд ФК2-18 (fig.1).

Интерпретирующие формулы, служащие для расчетов КДП по результатам измерений в мостовых схемах, получаются из решения электродинамической задачи о прохождении волны через слой диэлектрика конечной толщины, помещенного в однородную регулярную линию передачи. Измеряемыми величинами являлись модуль ослабления и фаза комплексного коэффициента прохождения, которые пересчитывались в комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) и коэффициент излучения в надир χ .

$$\epsilon = \epsilon' \left(1 + i \frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right) = \epsilon' (1 + i \cdot tg \delta); \quad \chi = 1 - \frac{|\sqrt{\epsilon - 1}|^2}{\sqrt{\epsilon + 1}}$$

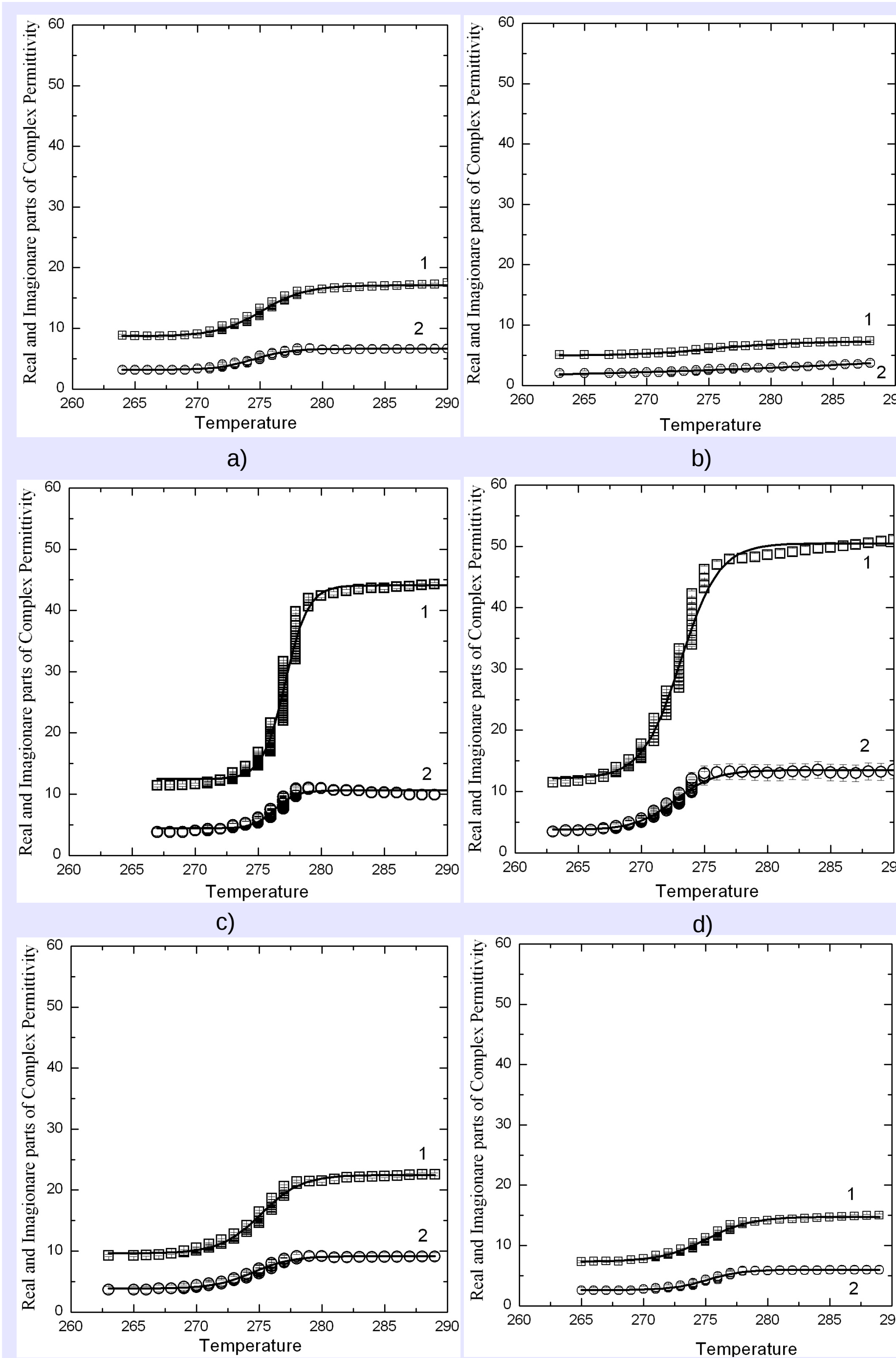


Fig. 2 Зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости на частоте 1.41 ГГц от температуры для образцов *Betula nana* (a, c, e) и *Salicaceae* (b, d, f), отобранных в апреле (a, b), августе (c, d), ноябре (e, f).

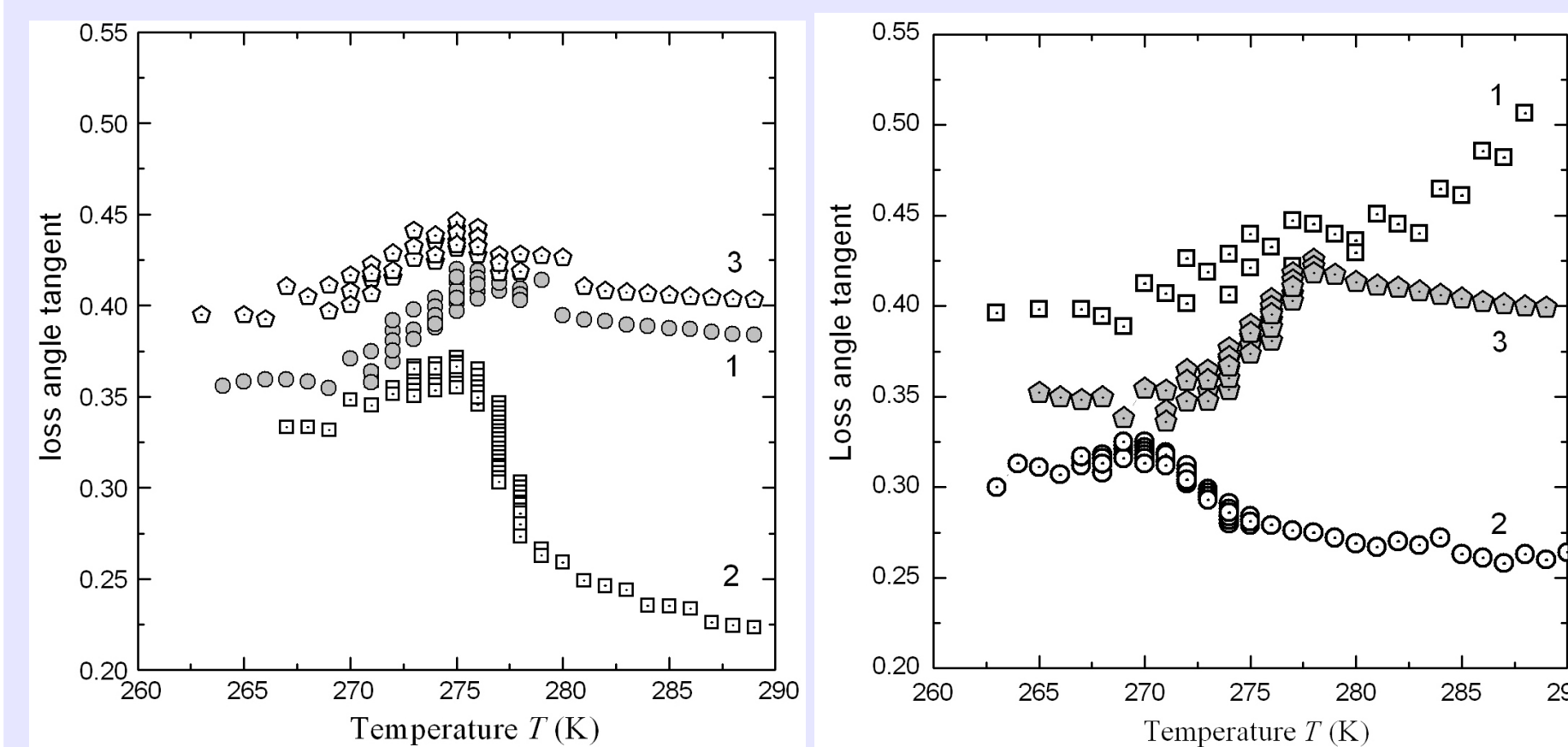


Fig. 3 Зависимости тангенса угла потерь на частоте 1.41 ГГц от температуры для образцов *Betula nana* (a) и *Salicaceae* (b), отобранных в апреле (1), августе (2), ноябре (3).

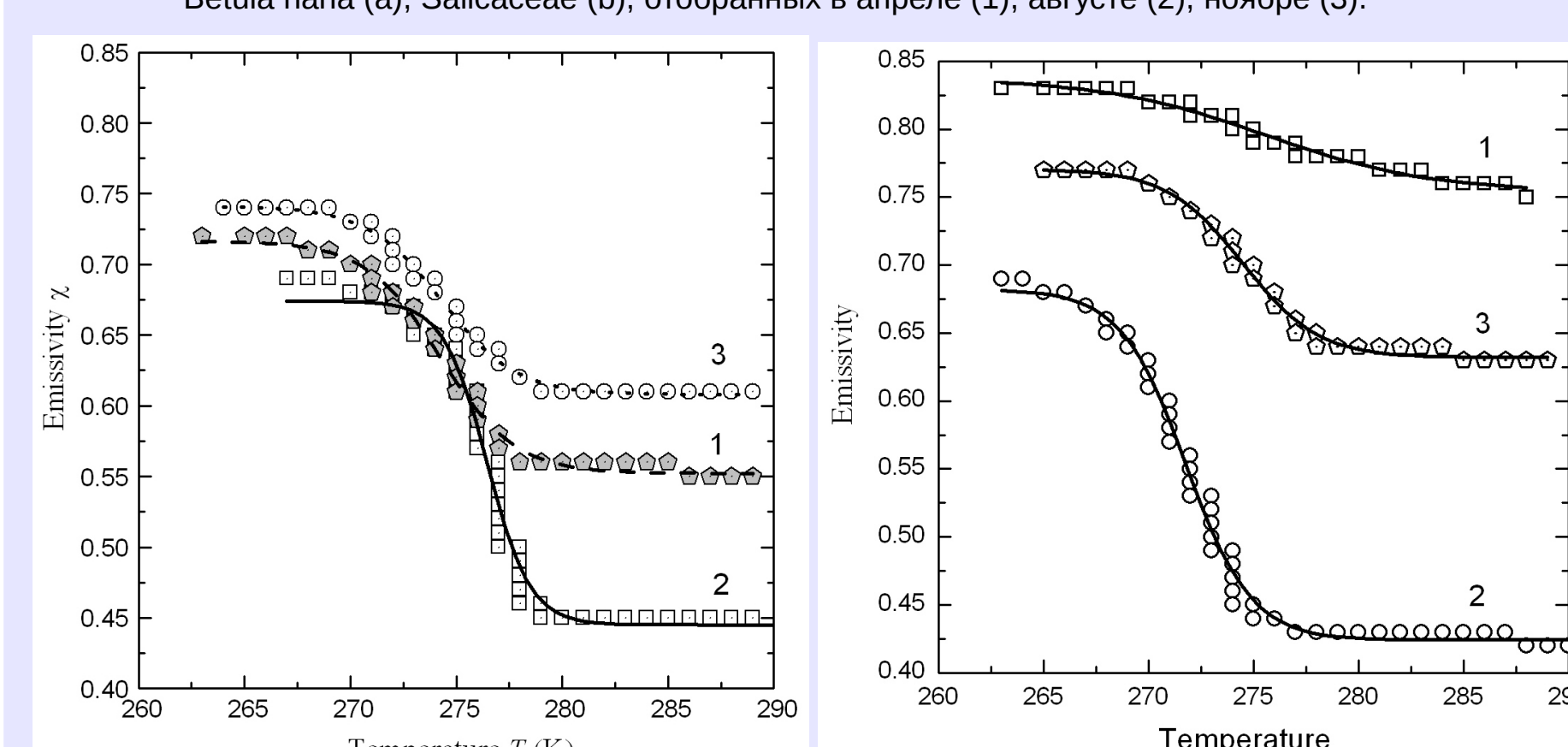


Fig. 4 Зависимости коэффициента излучения на частоте 1.41 ГГц от температуры для образцов березы карликовой (a), ивы (b), отобранных в апреле (1), августе (2), ноябре (3).

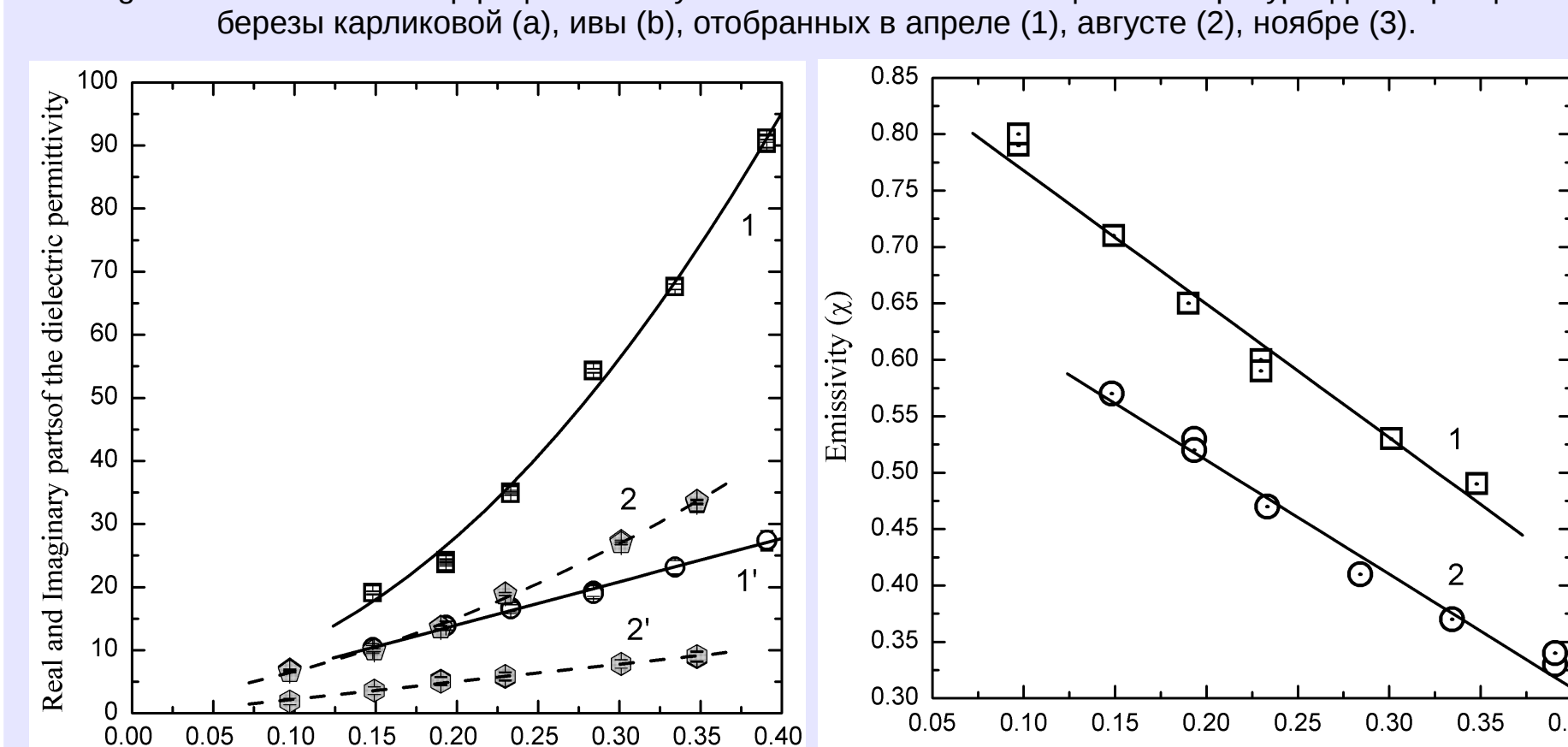


Fig. 5 Зависимости действительной (1, 2) и мнимой (1', 2') частей комплексной диэлектрической проницаемости (a) и коэффициента излучения (b) на частоте 1.41 ГГц от объемной влажности для образцов веток (1, 1') и листьев (2, 2') *Salicaceae*, отобранных в августе.

Месяц отбора	W	ρ	ε'₁	ε'₂	T₀	dT
<i>Betula nana</i>						
апрель	0.23	0.55	8.71±0.07	17.1±0.07	275.2±0.06	1.75±0.06
август	0.38	0.72	12.5±0.05	44.0±0.08	277±0.01	0.9±0.01
ноябрь	0.24	0.53	9.6±0.09	22.66±0.08	275.1±0.04	1.61±0.04
			ε''₁	ε''₂	T₀	dT
апрель	0.23	0.55	3.16±0.2	6.6±0.2	274.5±0.3	1.46±0.3
август	0.38	0.72	10.6±0.2	4.4±0.15	276.3±0.09	-0.82±0.08
ноябрь	0.24	0.53	3.8±0.24	9.2±0.2	274.5±0.2	1.57±0.2
			χ₁	χ₂	T₀	dT
апрель	0.23	0.55	0.74±0.002	0.608±0.002	274.3±0.1	1.75±0.09
август	0.38	0.72	0.67±0.004	0.445±0.004	276.5±0.1	1.02±0.06
ноябрь	0.24	0.53	0.74±0.004	0.55±0.002	272.2±0.1	1.78±0.08
<i>Salicaceae</i>						
			ε'₁	ε'₂	T₀	dT
апрель	0.08	0.37	4.94±0.09	7.3±0.1	275.6±0.4	3.2±0.5
август	0.4	0.71	12.1±0.08	50.5±0.1	273.0±0.1	1.52±0.01
ноябрь	0.16	0.47	7.34±0.08	14.76±0.08	275±0.1	1.83±0.07
			ε''₁	ε''₂	T₀	dT
апрель	0.08	0.37	3.94±1.3	1.72±0.7	278.3±0.5	-6±0.6
август	0.4	0.71	3.75±0.2	13.5±0.3	272.7±0.2	1.6±0.2
ноябрь	0.16	0.47	2.60±0.2	6±0.2	275.2±0.3	1.44±0.3
			χ₁	χ₂	T₀	dT
апрель	0.08	0.37	0.84±0.004	0.754±0.004	275.6±0.5	3.9±0.6
август	0.4	0.71	0.68±0.004	0.42±0.003	271.8±0.08	1.55±0.06
ноябрь	0.16	0.47	0.77±0.002	0.632±0.002	274.5±0.1	1.8±0.09

Таблица 1 – Численные значения эмпирических коэффициентов формулы (1)

Экспериментальные зависимости $\psi(\psi = \epsilon', \epsilon'', \chi)$ для *Betula nana* and *Salicaceae* от температуры T (в Кельвинах), с помощью программы Origin 6.1. аппроксимировали сигмоидальной функцией, имеющей вид $\psi = \psi_2 + (\psi_1 - \psi_2) / (1 + \exp(\frac{T - T_0}{dT}))$ (1)

Из сравнения графиков видно, что зависимости и для *Betula nana* and *Salicaceae* качественно похожи, но при этом имеют существенные количественные различия. Диэлектрические характеристики растительных образцов, относящихся к одной и той же породе дерева, но отобранных в разное время года (апрель, август, ноябрь), также заметно различаются. Возможными причинами сезонных вариаций диэлектрических и радиоизлучательных характеристик древесины одной и той же породы деревьев являются изменение влажности растительности, образование льда в растительных клетках, резкое отличие диэлектрических характеристик сухой древесины, клеточного сока и льда. Измеренные на частоте 1.41 ГГц диэлектрические характеристики клеточного сока березы и ивы, отобранных в августе, оказались близкими к диэлектрическим характеристикам пресной воды.

На приведенных графиках (как для *Betula nana* так и для *Salicaceae*) выделяются интервалы температур, характеризующиеся разным поведением ϵ' и ϵ'' : 262 до 270 К (1); 270 до 278 К (2); 278 до 290 К (3). В интервале (1) значения ϵ' и ϵ'' незначительно возрастают с повышением температуры. Это может быть вызвано частичным плавлением льда, образовавшегося из связанной воды и поэтому имеющего температуру плавления ниже температуры плавления льда, образовавшегося из свободной воды. В интервале (2) происходит таяние льда, образованного из свободной воды (клеточного сока). В результате уменьшения объемной доли льда (компонента с низкими значениями ϵ' и ϵ'') с одновременным увеличением объемной доли воды (компонента с высокими значениями ϵ' и ϵ'') значения ϵ' и ϵ'' с повышением температуры резко возрастают. В интервале (3) незначительное возрастание ϵ' и ϵ'' с повышением температуры может быть вызвано изменением растворимости минеральных и органических веществ, содержащихся в клеточном соке.

Из графиков, приведенных на fig. 3а (*Betula nana*), видно, что в интервале температур 262 до 270 К значения $tg \delta$ от температуры зависят слабо, но различаются для образцов с разной влажностью. В интервале 270 до 275 К $tg \delta$ возрастает с повышением T , а в интервале 275 до 278 К уменьшается, причем скорость изменения ($\Delta tg \delta / \Delta T$) зависит от W и тем выше, чем больше W . В интервале 278 до 290 К величина ($\Delta tg \delta / \Delta T$) ниже, чем в предыдущем случае. Продолжающееся в этом интервале уменьшение $tg \delta$ с повышением T может быть вызвано увеличением растворимости минеральных веществ, находящихся в клеточном соке.

Особенности поведения измеренных зависимостей для *Betula nana* и *Salicaceae* могут быть связаны с различным поведением внутри- и внеклеточной влаги в этих растениях при вариациях температуры и влажности, соответственно с их разной реакцией на температурные изменения. В свою очередь, особенности поведения диэлектрических характеристик древесины при изменениях температуры и влажности обуславливают сезонные изменения радиоизлучательных характеристик древесной растительности, связанные с переходом температуры окружающей среды через 0°C.

В летний период микроволновое излучение тундровой растительности зависит от радиоизлучательных характеристик древесины и листьев, которые, в свою очередь, зависят от температуры и влажности. Влияние объемной влажности (W) исследовали на примере веток и листьев ивы, отобранных в августе. Диэлектрические измерения проводили при температуре 290 К. На fig. 5а приведены зависимости $\epsilon'(W)$, $\epsilon''(W)$ и $\chi(W)$ для веток (1, 1') и листьев (2, 2'). Видно, что ветки характеризуются более высокими значениями ϵ' и ϵ'' по сравнению с листьями. Это может быть связано с большей объемной долей свободной воды в межклеточном пространстве веток, по сравнению с листьями. На fig. 5б приведены зависимости $\chi(W)$ (1, 2) для веток (1) и листьев (2), аппроксимированные прямыми линиями, имеющими вид:

$$\text{для веток: } \chi = (0.89 \pm 0.009) - (1.18 \pm 0.04) \cdot W, \sigma = 0.111$$

$$\text{для листьев: } \chi = (0.71 \pm 0.008) - (1.01 \pm 0.03) \cdot W, \sigma = 0.116$$

Различие зависимостей $\chi(W)$ для веток и листьев, а также отсутствие листьев в холодный период указывает на необходимость учета сезонных изменений радиоизлучательных характеристик древесины и листьев при дистанционном микроволновом зондировании подстилающей поверхности тундры при наличии развитой древесной растительности.