

УДК 537.86

Моделирование диэлектрических свойств снеговой воды с малой концентрацией растворенных веществ

А.Н. Романов¹, А.Ю. Суковатова², В.Ф. Рапута^{3*}

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

²Алтайский государственный университет
656015, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

³Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

Поступила в редакцию 15.11.2012 г.

Установлены зависимости диэлектрических характеристик снеговой воды от загрязняющих веществ, собравшихся в снеговом покрове за весь период снегонакопления. Приведены результаты расчета диэлектрических свойств с учетом накопившихся химических веществ. Предложена методика, характеризующая влияние накопившихся в снеговом покрове веществ на диэлектрические свойства снеговой воды с использованием регрессионного анализа.

Ключевые слова: диэлектрические характеристики, многомерный анализ данных, снеговой покров; dielectric characteristics, multivariate analysis, snow cover.

Введение

Снежный покров, образующийся во многих регионах земного шара с холодным или умеренным климатом и существующий значительную часть года, является своеобразным индикатором ряда биосферных процессов. Так, например, измерение массовых концентраций химических веществ, накапливающихся в снежном покрове в результате выпадения их из атмосферы, позволяет оценивать экологическое состояние атмосферы [1–3]. В работе [1] на основе данных по химическому составу атмосферных осадков, отобранных за период с 1999 по 2010 г. в Байкальском регионе, исследована динамика антропогенного загрязнения атмосферы, рассчитан суммарный показатель загрязнения. На основе экспериментальных данных установлена сезонная изменчивость минерализации атмосферных осадков. Показано, что большая минерализация снежного покрова связана со значительно меньшим количеством осадков и большей загрязненностью атмосферы в зимний период.

Одним из ключевых индикаторов антропогенного загрязнения воздуха в населенных пунктах являются окислы азота, концентрация которых может быть оценена на основе инвентаризации выбросов промышленных предприятий и транспорта, а также путем измерения интегрального содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы по зенитным спек-

тральным наблюдениям рассеянной солнечной радиации на длине волны 450 нм [2]. Для оценки суммарного содержания загрязняющих веществ в атмосфере за зимний сезон определяют их содержание в снеговом покрове за весь период снегонакопления [3].

Помимо растворимых веществ в снежном покрове может аккумулироваться эоловый материал, включающий в себя нерастворимые частицы антропогенного, литогенного и биогенного происхождения.

Исследования эолового материала береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря показали, что формирование вещественного состава снежного покрова происходит под воздействием как локального, так и дальнего воздушного переноса. Совместный анализ эолового материала, накопившегося в снежном покрове, и преобладающих направлений воздушных потоков в течение зимнего сезона позволяет выявить источник поступления различных веществ, включая тяжелые металлы, диатомовые водоросли и т.д. [4].

Дистанционное зондирование снежного покрова в оптическом диапазоне несет важную информацию о степени загрязнения территории. Разработаны дистанционные методы оценки степени загрязнения подстилающей поверхности в зимний период, основанные на использовании оптических систем дистанционного зондирования [5–8].

Исследование диэлектрических свойств снега позволяет использовать микроволновый диапазон для дистанционного зондирования снежного покрова. В [9] представлены результаты измерений диэлектрических параметров солевого рассола, образующегося в мокром снеге, приведена эмпирическая

* Андрей Николаевич Романов (ran@iwer.ru); Анна Юрьевна Суковатова (usanna1311@gmail.com); Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru).

модель диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь для мокрого снега и однолетнего морского льда. Установленные зависимости между диэлектрическими параметрами и физико-химическими характеристиками снега используются для дистанционного зондирования снежно-ледовых покровов и моделирования процессов теплообмена между атмосферой и океаном [10]. Разработан алгоритм использования микроволновой радиометрии для оценки термофизических свойств снежного покрова и речного льда [11].

Для оценки уровня загрязненности территории и пространственного распределения атмосферных загрязнителей требуются, как правило, отбор значительного количества снеговых проб и их последующий химический анализ. Снижение трудоемкости работ возможно путем разработки и внедрения оперативных электрофизических методов диагностики природных сред, в частности диэлькометрии и радиометрии.

В настоящей статье приведены зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей комплексной диэлектрической проницаемости снеговой воды от массовой концентрации растворенных веществ.

Отбор проб снега производили снегоотборником (пластиковая труба диаметром 5 см). Снег отбирали на всю глубину снежного покрова на участках с разной степенью загрязненности.

Измерения диэлектрических параметров проводили в частотном диапазоне 0,6–1,42 ГГц. Измеряли амплитуду и фазу электромагнитной волны, прошедшей через заполненный снеговой водой измерительный контейнер, представлявший собой коаксиальный волновод длиной 1 см. Исследовали зависимости ϵ' и ϵ'' от массовых долей следующих химических веществ, растворенных в снеговой воде: CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_2^- , NO_3^- , P и др. Для моделирования диэлектрических свойств снеговой воды, характеризующейся малой концентрацией растворенных солей, использовали методы регрессионного анализа [12]. Ранее в работе [13] было показано, что использование методов регрессионного анализа позволяет установить зависимости ϵ' и ϵ'' от массовых концентраций перечисленных солей для сильноминерализованной воды, отобранной из соленых озер Кулундинской равнины (Алтайский край).

Методика измерений и обработка данных

Диэлектрические характеристики снеговой воды измеряли в дециметровом диапазоне, в котором проявляется влияние ионной проводимости, обусловленное растворенными в снеговой воде солями. Использовали метод мостовых схем, обладающий высокой точностью определения диэлектрических параметров дисперсных смесей и жидкостей, характеризующихся высокой поглощательной способностью. Лабораторная установка, выполненная с использованием измерительного и опорного каналов

промышленного фазометра ФК2-18, позволяла измерять диэлектрические параметры жидкостей в диапазоне частот от 300 МГц до 5,0 ГГц и имела следующие технические характеристики: диапазон однозначных измерений фазы $\pm 180^\circ$; диапазон измерения затуханий от 0 до 60 дБ; погрешность измерений ослабления 0,5 дБ, фазы 2° .

В результате химического анализа определяли массовые доли S_i растворенных веществ. Измеряли на разных частотах ослабление A и сдвиг фазы ϕ электромагнитной волны в исследуемом образце, используемые в дальнейшем для расчета ϵ' и ϵ'' . Измерения диэлектрических параметров воды проводили при температуре $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ [13].

Для установления зависимостей ϵ' и ϵ'' от суммы массовых долей $\sum S_i$ растворенных в снеговой воде веществ использовали следующие методы регрессионного анализа данных: регрессию на главные компоненты (РГК) и проекцию на латентные структуры (ПЛС) [12]. Многомерную калибровку экспериментальных данных проводили по 30 образцам воды по методике, примененной ранее в [13]. Строили многомерную регрессионную модель (X, Y) для экспериментальных данных, которую затем использовали для определения новых значений Y по новым измерениям X . Смысл этой операции заключался в том, чтобы получить возможность в дальнейшем не измерять Y , а определять их по X .

Результаты эксперимента и обсуждение

В результате моделирования разными методами были установлены следующие зависимости ϵ' и ϵ'' от массовых долей химических веществ S_i и частоты сигнала f (0,6; 1,11; 1,42 ГГц):

1. Метод РГК: для всех частот в диапазоне от 0,6 до 1,11 ГГц:

$$n = 8,83 + 0,6f + 0,0000S_1 - 0,009S_2 + 0,031S_3 + 0,012S_4 - 0,0776S_5 - 0,026S_6, \quad \sigma = 0,06; \quad (1)$$

$$k = -0,59 + 0,98f + 0,0001S_1 - 0,0046S_2 + 0,0303S_3 + 0,011S_4 - 0,0035S_5 - 0,044S_6, \quad \sigma = 0,25. \quad (2)$$

2. Метод РГК: для частоты 0,6 ГГц:

$$n = 9,18 - 0,114S_1 - 0,35S_2 + 0,031S_3 - 0,54S_4 - 1,09S_5 - 0,57S_6, \quad \sigma = 0,04; \quad (3)$$

$$k = -0,02 - 0,11S_1 + 0,34S_2 - 0,081S_3 - 0,46S_4 - 0,97S_5 - 0,32S_6, \quad \sigma = 0,01. \quad (4)$$

3. Метод ПЛС: для всех частот в диапазоне от 0,6 до 1,11 ГГц:

$$n = 8,86 + 0,57f - 0,0001S_1 - 0,014S_2 + 0,06S_3 + 0,016S_4 - 0,13S_5 - 0,05S_6, \quad \sigma = 0,06; \quad (5)$$

$$\kappa = 0,56 + 0,0003f + 0,0021S_1 + 0,0002S_2 - 0,0000S_3 + \\ + 0,0000S_4 - 0,0001S_5 - 0,0000S_6, \quad \sigma = 0,01. \quad (6)$$

4. Метод ПЛС: для частоты 0,6:

$$n = 9,18 - 0,0021S_1 - 0,0027S_2 + 0,0002S_3 - \\ - 0,0000S_4 - 0,0006S_5 - 0,0003S_6; \quad \sigma = 0,06; \quad (7)$$

$$\kappa = -0,02 + 0,0007S_1 + 0,0006S_2 + 0,0002S_3 + \\ + 0,0000S_4 + 0,00001S_5 - 0,0000S_6, \quad \sigma = 0,01, \quad (8)$$

где i – индекс, относящийся к следующим химическим веществам, растворенным в воде: 1 – Cl^- (хлорид), 2 – SO_4^{2-} (сульфат), 3 – NO_3^- (нитрат), 4 – F^- (фторид), 5 – PO_4^- (фосфат), 6 – NO_2^- (нитрит).

Исследованные величины изменялись в следующих пределах (мг/л): $S_1 = 0,6 \div 1,5$, $S_2 = 1,6 \div 3,7$, $S_3 = 1,8 \div 3,1$, $S_4 = 0,02 \div 0,07$, $S_5 < 0,03$, $S_6 < 0,2$, $f = 0,6 \div 1,42$ ГГц.

Использование установленных эмпирических зависимостей n и κ от исследованных параметров позволяет рассчитать численные значения ϵ' и ϵ'' по химическим параметрам воды для разных случаев. Построение таких моделей позволит контролировать уровень загрязнения снежного покрова и таким образом осуществлять диагностику экологического состояния территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 84 «Анализ рисков заболеваемости населения территорий Сибири на основе малопараметрических реконструкций полей химического и радиоактивного загрязнения» и программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет» на 2012–2016 гг. «Развитие Алтайского государственного университета в целях модернизации экономики и социальной сферы Алтайского края и регионов Сибири», мероприятие «Конкурс грантов» (№ 2012.312.2.2).

1. Нецветова О.Г., Онищук Н.А., Зимник Е.А., Сезько Н.П., Доля-Лопатина И.Н., Ходжер Т.В. Динамика химического состава атмосферных осадков в Байкальском регионе // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 507–512.
2. Иванов В.А., Елохов А.С., Постыляков О.В. О возможности оценки объема выбросов NO_2 в городах по зенитным спектральным наблюдениям рассеянной солнечной радиации вблизи 450 нм // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 544–549.

3. Коковкин В.В., Рапута В.Ф., Морозов С.В., Романов А.Н. Исследование процессов регионального загрязнения снежного покрова городами юга Западной Сибири // Ползуновский вестник. 2011. № 4–2. С. 89–93.
4. Топчая В.Ю., Чечко В.А., Шевченко В.П. Вещественный состав эолового материала, содержащегося в снежном покрове береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 518–522.
5. Кульчин Ю.Н., Букин О.А., Константинов О.Г., Вознесенский С.С., Павлов А.Н., Гамаюнов Е.Л., Майор А.Ю., Столярчук С.Ю., Коротенко А.А., Потик А.Ю. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть 1. Концепция построения многоуровневых измерительных систем для экологического мониторинга прибрежных акваторий // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 633–637.
6. Константинов О.Г., Павлов А.Н. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть 2. Регистрация загрязнения на морской поверхности // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 902–908.
7. Букин О.А., Кульчин Ю.Н., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А. Характеристика структуры и динамики ППС в переходной зоне «материк–океан». Часть 1. Зимний период // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 694–701.
8. Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Маслов В.А. Исследование проб пылевого аэрозоля и почв методом лазерной флуориметрии // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 644–649.
9. Geldsetzer T., Langlois A., Yackel J. Dielectric properties of brine-wetted snow on first-year sea ice // Cold Regions Science and Technology. 2009. V. 58, iss. 1–2. P. 47–56.
10. Galley R.J., Trachtenberg M., Langlois A., Barber D.G., Shafai L. Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness // Cold Regions Science and Technology. 2009. V. 57, iss. 1. P. 29–38.
11. Langlois A., Barber D.G., Hwang B.J. Development of a winter snow water equivalent algorithm using in situ passive microwave radiometry over snow-covered first-year sea ice // Remote Sens. Environ. 2007. V. 106, iss. 1. P. 75–88.
12. Эбсенен К. Анализ многомерных данных. Избранные главы / пер. с англ. С.В. Кучеряевского; под. ред. О.Е. Родионовой. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. 157 с.
13. Суковатова А.Ю., Романов А.Н., Оскорбин Н.М. Моделирование диэлектрических свойств воды из природных минерализованных водоемов с использованием регрессионного анализа // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 1007–1008.

A.N. Romanov, A.Yu. Sukovatova, V.F. Raputa. Modeling of snow water dielectric properties with small concentration of solution matters.

In this paper the dependence of snow water dielectric characteristics on pollutants accumulated in snow cover for all the period of snow accumulation is defined. The results of calculation of dielectric characteristics considering the accumulated pollutants are presented. A technique that characterizes the impacts of accumulated pollutants in snow cover on the dielectric properties of snow water using regression analysis is suggested.