

УДК 551.501.776

Использование линейных регрессионных соотношений, полученных на основе модельных и экспериментальных данных, для определения водозапаса облаков из наземных микроволновых измерений

Е.Ю. Бирюков, В.С. Косцов*

Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 25.02.2019 г.

Представлены оценки погрешности определения водозапаса облаков методом множественной линейной регрессии (МЛР) при использовании различных регрессионных соотношений, полученных как по модельным расчетам, так и по экспериментальным данным (в качестве эталона были взяты результаты метода, основанного на обращении уравнения переноса излучения). Показано, что при «обучении» метода МЛР по экспериментальным данным и использовании измерений в семи спектральных каналах радиометра случайная составляющая погрешности определения водозапаса равна 0,015–0,017 кг/м², что в 2 раза меньше, чем при обучении МЛР по результатам модельных расчетов. Систематическая составляющая погрешности при этом не превышает 0,005 кг/м². Результаты МЛР позволяют надежно идентифицировать периоды ясной погоды по критерию минимума вариаций водозапаса.

Ключевые слова: водозапас облаков, тропосфера, дистанционное зондирование, микроволновый радиометр, обратные задачи, регрессионное соотношение; cloud liquid water path, troposphere, remote sensing, microwave radiometer, inverse problems, linear regression.

Введение

Облака — это важный элемент формирования погоды и климата планеты. Одной из основных характеристик облаков является водозапас — масса жидкокапельной влаги в столбе облачного воздуха единичного сечения (ниже мы будем использовать для него обозначение W). Измерение водозапаса — одно из важнейших звеньев в изучении строения, эволюции и физических свойств облачности. Для получения данных о водозапасе облаков используются в основном спутниковые и наземные дистанционные методы, поскольку контактные измерения водности облаков (масса воды в единичном объеме) с борта самолета не оперативны, не позволяют контролировать интегральные характеристики, к которым принадлежит водозапас, и исследовать пространственно-временную изменчивость параметров облака, так как количество измерений в конкретном облаке во время пролета самолета, как показала практика, очень мало.

Настоящая работа посвящена дистанционному определению водозапаса облаков в тропосфере по данным наземных измерений нисходящего микроволнового излучения. Основные принципы определения

параметров тропосферы (в том числе водозапаса облаков) микроволновыми дистанционными методами изложены в обзоре [1], в котором также представлены примеры соответствующей современной измерительной аппаратуры. Эта методика используется уже несколько десятилетий. Тем не менее до настоящего времени некоторые проблемы, относящиеся к определению W , остаются не до конца решенными, в частности проблема учета систематической составляющей погрешности (b), а также проблема валидации получаемых результатов и повышения их точности.

В настоящее время оценку систематической составляющей погрешности водозапаса проводят по микроволновым измерениям в ясную погоду при отсутствии облачности. В качестве такой оценки берутся средние значения W , соответствующие периодам с минимальными вариациями водозапаса, поскольку минимум изменчивости W является критерием полного отсутствия жидкой воды в тропосфере. Подробные исследования систематической составляющей погрешности определения водозапаса представлены в [2, 3]. Причиной изменчивости систематической составляющей погрешности с течением времени может являться, в частности, дрейф параметров аппаратуры [3]. В работе [4] показано, что чувствительность систематической погрешности к изменению параметров аппаратуры различна для разных методов решения обратной задачи определения

* Егор Юрьевич Бирюков (st023805@student.spbu.ru, rekr90@gmail.com); Владимир Станиславович Косцов (v.kostsov@spbu.ru).

водозапаса. Было обнаружено, что при сбоях аппаратуры в каких-либо спектральных каналах при использовании метода множественной квадратической регрессии (МКР) систематическая погрешность изменялась на порядок величины, в то время как систематическая погрешность метода решения обратной задачи, основанного на обращении уравнения переноса излучения (ОУПИ), не претерпевала заметных изменений. Также было обнаружено, что метод МКР не позволяет надежно идентифицировать периоды отсутствия облачности по критерию минимальных вариаций W . Причиной описанных недостатков метода МКР является нелинейность регрессионных соотношений, и, как следствие, более сильный, по сравнению с методом множественной линейной регрессии (МЛР), отклик на изменение атмосферного сигнала или появление сбоев в каналах аппаратуры.

Указанные выше недостатки метода МКР стимулировали постановку задачи по поиску оптимальной реализации метода МЛР для определения водозапаса — реализации, которая бы обеспечивала высокую точность при малых реакциях на сбой аппаратуры. Выбор в пользу именно регрессионного метода решения обратной задачи, а не метода ОУПИ, обусловлен его широкой распространенностью в мировой практике микроволнового зондирования при определении не только интегральных параметров (водозапас облаков и интегральное содержание водяного пара), но и профилей температуры и влажности.

В настоящей работе исследование проводится на основе большого массива результатов измерений нисходящего микроволнового излучения радиометром RPG-HATPRO (Radiometer Physics GmbH — Humidity And Temperature PROfiler, компания Radiometer Physics GmbH), который функционирует на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) в ресурсном центре «Геомодель» с 2012 г. Технические характеристики микроволнового радиометра RPG-HATPRO представлены на сайте разработчика, там же доступны для загрузки руководства по установке, эксплуатации и проведению измерений [5]. Различные аспекты использования этого прибора в научных исследованиях и при сетевых измерениях подробно обсуждаются в [6].

Постановка задачи и схемы расчетов

Исходными данными для решения задачи являются:

— результаты измерений яркостной температуры нисходящего микроволнового излучения в зенитном направлении прибором RPG-HATPRO в 2013–2014 гг.;

— результаты определения водозапаса облаков методом ОУПИ, разработанным в СПбГУ и адаптированным к обработке данных радиометра RPG-HATPRO [7];

— статистическая модель атмосферы (2311 наборов вертикальных профилей давления, температуры,

влажности атмосферы и водности облаков), предназначенная для расчетов яркостной температуры нисходящего микроволнового излучения при моделировании измерений RPG-HATPRO.

Случайная погрешность измерений яркостной температуры в так называемых «влажностных» спектральных каналах (22,24; 23,04; 23,84; 25,44; 26,24; 27,84; 31,40 ГГц) составляет 0,1 К, а в «температурных» (51,26; 52,28; 53,86; 54,94; 56,66; 57,30; 58,00 ГГц) — 0,2 К. Систематическая погрешность измерений, обусловленная конечной точностью процесса калибровки с использованием жидкого азота, может достигать 0,5 К.

Среднеквадратическая погрешность определения W методом ОУПИ составляет при малых значениях водозапаса 0,001 кг/м², а систематическая — 0,009–0,010 кг/м² [4]. Случайная погрешность определения водозапаса, полученная из расчетов матрицы ошибок метода ОУПИ во всем диапазоне наблюдаемых значений W , варьирует в пределах 0,002–0,008 кг/м² в зависимости от атмосферных условий и величины W . Для сравнения укажем, что среднеквадратическая погрешность при определении W встроенным алгоритмом, декларируемая разработчиком аппаратуры, составляет 0,002 кг/м². По независимым оценкам она равна 0,005 кг/м² при малых значениях водозапаса [4]. Величина систематической составляющей разработчиком не декларируется, а согласно независимым оценкам она очень сильно варьирует [4].

Статистическая модель в своей основе имеет набор данных, включающий температуру, давление и газовый состав атмосферы, известный как TIGR [8], а также набор данных с профилями водности облаков, который был создан на основе судовых аэрологических и гидрометеорологических измерений на островных станциях. Этот набор данных был предоставлен коллективу кафедры физики атмосферы СПбГУ сотрудниками международного Центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена [9]. Он применялся в Центре при разработке и тестировании нейронно-сетевой алгоритма обработки спутниковых измерений радиотеплового излучения [10, 11]. Используемая в настоящей работе статистическая модель была скомпилирована коллективом авторов СПбГУ ранее в ходе исследований, посвященных космическим экспериментам с аппаратурой ИКФС-2 и МТВЗА на российском спутнике «Метеор».

Прежде чем перейти к описанию этапов решения поставленной задачи, необходимо вновь упомянуть о проблеме оценки систематической погрешности определения W . Как показала практика определения водозапаса облаков наземным микроволновым методом, контроль систематической погрешности необходимо проводить постоянно (см. выше). При этом следует идентифицировать ближайший по времени период ясной погоды, используя критерий минимума вариаций W , и провести оценку b . Совершенно очевидно, что существуют географические районы, в которых из-за их климатических особенностей периоды ясной погоды могут

быть очень редкими. Поэтому одним из требований к оптимальному методу решения обратной задачи по определению W является минимальное значение b . При удовлетворении данного требования можно было бы пренебречь вариациями b , обусловленными дрейфом параметров аппаратуры, аппаратурными сбоями и изменениями атмосферного сигнала, и рассматривать ее как постоянную величину в периоды отсутствия ясной погоды, когда ее контроль невозможен.

Решение поставленной задачи проводилось в два этапа. Первый этап заключался в получении коэффициентов регрессионных соотношений метода МЛР — будем для краткости (и по аналогии с методом нейронных сетей) называть эту процедуру «обучением» метода МЛР на массиве данных. Массив данных будем называть «обучающим». Второй этап — оценка случайной и систематической составляющих погрешности («тестирование» метода МЛР) на массиве данных, который будем называть «тестовым». Рассматривались четыре схемы «обучение — тестирование» (см. табл. 1).

Схема С1 основана на обучении МЛР по модельным расчетам. Такой подход широко используется, однако он не лишен недостатков, среди которых можно указать следующие:

1) возможное несоответствие статистического ансамбля, использованного для расчета регрессионного оператора, конкретным атмосферным ситуациям в период измерений (неадекватность ансамбля или его неполнота);

2) наличие погрешностей расчета коэффициентов поглощения при вычислении яркостной температуры в спектральных каналах прибора, несмотря на постоянное совершенствование методик и уточнение спектроскопических параметров [12];

3) несоответствие моделируемых характеристик аппаратуры при вычислении яркостной температуры (частоты, ширины полосы, спектральной аппаратной функции каналов, диаграммы направленности и т.п.) конкретному экземпляру прибора вследствие дрейфа параметров аппаратуры.

Три другие схемы (С2, С3, С4) лишены вышеуказанных недостатков, поскольку основаны на обучении МЛР по экспериментальным данным, в каче-

стве которых выступают результаты, полученные методом ОУПИ в 2013 г. Поскольку эти результаты имеют погрешность, они принимаются за эталон лишь условно. При этом они используются в качестве обучающего массива данных в двух видах. В первом случае для них не выполнялась процедура оценки и исключения систематической погрешности, во втором случае — выполнялась. Для тестового массива (результаты обработки данных 2014 г. методом ОУПИ) такая процедура, естественно, выполнялась. Необходимо подчеркнуть, что систематическая составляющая не постоянна и зависит от времени. Ее значение определялось по величине водозапаса в периоды ясной погоды. А эти периоды, в свою очередь, идентифицировались по критерию минимума вариаций водозапаса. В промежутках между этими периодами значения определялись интерполяцией. Поэтому разность между элементами обучающего массива схемы С2 и соответствующими им элементами схем С3 и С4 не является постоянной.

Непосредственно при тестировании полученных регрессионных соотношений также рассматривались два варианта. Для схем С1, С2 и С3 производились оценка и исключение b перед сравнением с тестовыми данными. Для схемы С4 эта процедура не выполнялась.

В качестве примера приведем порядок действий, соответствующий схеме С3.

1. За исходные данные для расчета регрессионных коэффициентов берутся значения измеренных в течение 2013 г. яркостных температур и соответствующие им значения W , полученные методом ОУПИ с последующим исключением систематической погрешности.

2. Рассчитываются регрессионные коэффициенты.

3. С помощью полученных регрессионных соотношений по данным измерений яркостных температур в 2014 г. рассчитываются значения W .

4. Из полученных результатов производится исключение систематической составляющей погрешности. При этом используются временные периоды ясной погоды, которые были определены методом ОУПИ и использовались для исключения в нем систематической погрешности.

Т а б л и ц а 1

Схемы расчетов «обучение — тестирование» метода МЛР

Схема расчета	Обучающий массив данных	Тестовый массив данных	Особенности учета систематической погрешности b при тестировании
С1	Статистическая модель и результаты расчетов яркостной температуры на ее основе	Измерения и результаты их обработки методом ОУПИ (с оценкой и исключением b) в течение 2014 г.	Оценка и исключение b перед сравнением с тестовыми данными
С2	Измерения и результаты их обработки методом ОУПИ в течение 2013 г. (без оценки и исключения b)		
С3	Измерения и результаты их обработки методом ОУПИ в течение 2013 г. (с оценкой и исключением b)		
С4	Измерения и результаты их обработки методом ОУПИ в течение 2013 г. (с оценкой и исключением b)		Без оценки и исключения b

5. Проводится сравнение полученных результатов определения W с тестовыми значениями. Определяются систематическая и случайная погрешности по отношению к тестовым данным.

Расчеты были проведены для двух регрессионных соотношений МЛР с разным количеством коэффициентов. Первое соотношение соответствовало использованию измерений во всех семи спектральных каналах аппаратуры RPG-HATPRO, которые предназначены для определения влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков (22,24; 23,04; 23,84; 25,44; 26,24; 27,84; 31,40 ГГц). Второе соотношение предполагало использование двух каналов (22,24 и 31,40 ГГц). Они были выбраны как имитация специализированных двухканальных радиометров для измерений общего влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков. В качестве примера можно привести радиометры на зарубежных измерительных станциях Chilbolton, Великобритания (22,2 и 28,8 ГГц), и Palaiseau, Франция (24 и 37 ГГц) [13], а также российский комплекс «Микрораджком», в состав которого входят два одноканальных радиометра с частотами 22,235 и 37,5 ГГц [14].

Количество измерений в обучающем массиве составляло 168875, в тестовом — 171825. Для исследования были выбраны 2013 и 2014 гг., поскольку

для них данные прошли всестороннюю валидацию и подробный анализ [4].

Обсуждение результатов

Поскольку количество измерений водозапаса, с помощью которых осуществляется тестирование, велико, результаты сопоставления расчетных и тестовых значений представлены не в виде обычных диаграмм рассеяния, а в виде двумерных частотных распределений (рис. 1). При построении этих распределений диапазон значений водозапаса был разбит на равные интервалы величиной $0,01 \text{ кг/м}^2$. Шкала показывает количество точек, содержащихся в двумерном интервале $([x_i, x_{i+1}], [y_j, y_{j+1}])$, где в качестве x выступают тестовые значения водозапаса W_t , а в качестве y — расчетные значения водозапаса W_n , где n — номер схемы «обучение — тестирование». Прежде чем перейти к анализу результатов, отметим, что в тестовом наборе данных присутствует некоторое количество отрицательных значений W_t .

Наибольшее число измерений (тысячи) приходится на малые значения водозапаса, не превышающие $0,050 \text{ кг/м}^2$. Число результатов, дающих

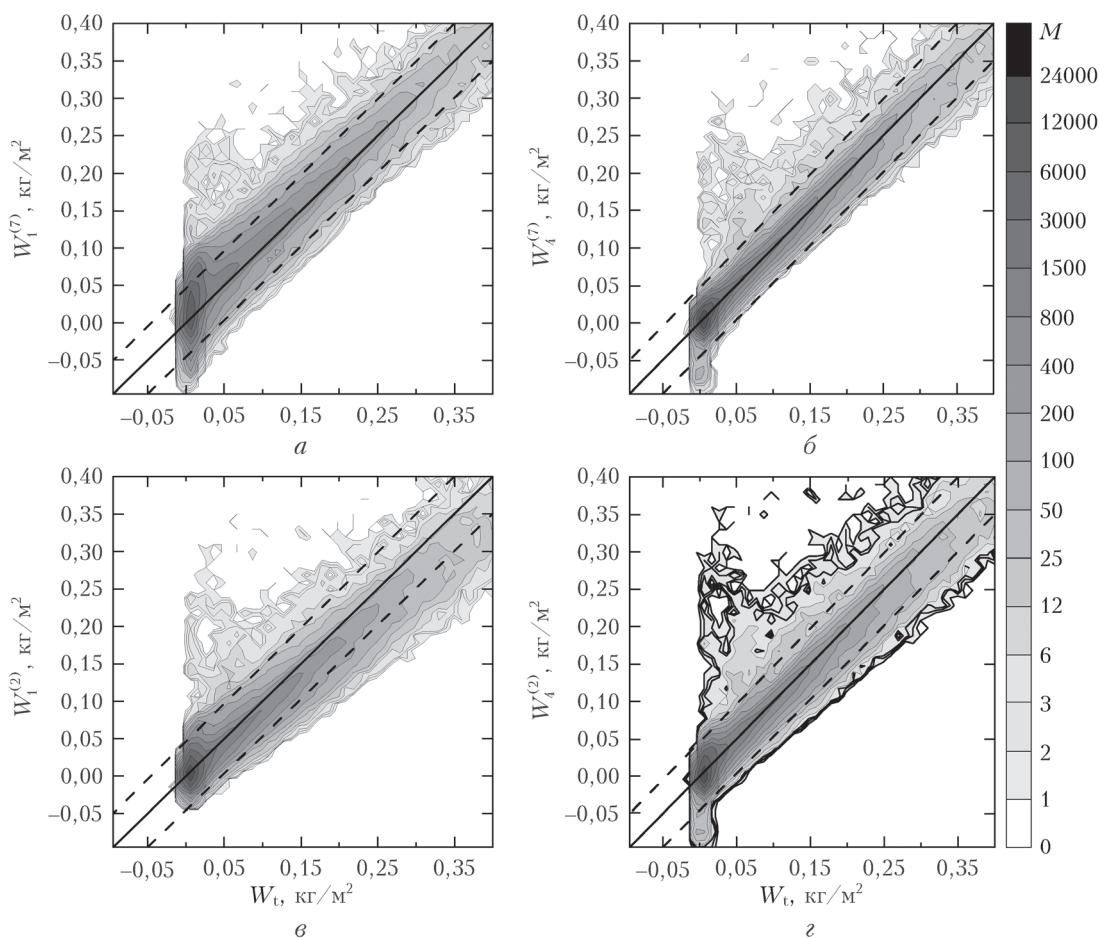


Рис. 1. Двумерное частотное распределение (M — абсолютное число измерений) результатов расчетных схем и тестовых значений водозапаса: показаны результаты МЛР для измерений в семи- ($a, б$) и двухспектральных ($в, з$) каналах и для схем С1 ($a, в$) и С4 ($б, з$)

большие значения, близкие к $0,4 \text{ кг/м}^2$, — всего несколько десятков. Для схемы С1 характерны небольшое превышение расчетных значений над тестовыми во всем их диапазоне при семиканальных измерениях и обратная ситуация для двухканальных измерений. Обращает на себя внимание различие в «ширине» двумерного распределения при малых величинах водозапаса: для семиканальных измерений ширина больше, чем для двухканальных, что является свидетельством большей абсолютной погрешности определения малых значений W .

Таким образом, использование дополнительных каналов повышает точность для больших значений водозапаса, но при этом понижает ее для малых значений. Подчеркнем, что данный вывод относится к конкретному модельному ансамблю, использованному в настоящей работе для обучения алгоритма. Распределения для схем С2 и С3 на рисунке не показаны, поскольку сходны с распределениями для схемы С4, за исключением одной особенности: у схемы С4 много отрицательных расчетных значений водозапаса для тестовых значений, не превышающих $0,025 \text{ кг/м}^2$ (по сравнению с другими схемами). Занижение W регрессионным алгоритмом в схеме С4 имеет место и для $W > 0,2 \text{ кг/м}^2$, что проявляется в уширении и смещении «вниз» двумерного распределения для этих значений (для схем С2, С3 «гребни» распределения более «острые»).

Характеристики точности метода МЛР для различных схем его реализации представлены в табл. 2. Значение $0,4 \text{ кг/м}^2$ взято в качестве верхнего предела, поскольку принято считать, что $W > 0,4 \text{ кг/м}^2$ соответствует дождевым облакам [15], а при дожде рассматриваемый микроволновый метод не работает. Заметим, что погрешность значений коэффициентов корреляции во всех случаях не превышает $0,003$. Для удобства сравнения расчетных схем в табл. 2 полужирным выделены значения, соответствующие

наименьшим погрешностям и наибольшим коэффициентам корреляции.

Из данных табл. 2 следуют три вывода.

1. По совокупности параметров наименее предпочтительной является схема С1 (обучение по модельным данным).

2. Значения погрешностей и коэффициентов корреляции для схем С2–С4 (обучение по экспериментальным данным) различаются незначительно.

3. Схеме С4 можно отдать предпочтение по сравнению с другими при использовании как семи-, так и двухканальных измерений.

Как отмечалось выше, учет и исключение систематической погрешности являются важными задачами. Поэтому мы приводим в качестве примера результаты определения водозапаса в период ясной погоды при отсутствии облачности, полученные с использованием различных расчетных схем. На рис. 2 показан период продолжительностью 1 ч в зимнее время, когда, согласно методу ОУПИ, наблюдались минимальные вариации полученных значений водозапаса облачности. На рисунке в дополнение к W_t и W_{1-4} приведены исходные значения из тестового массива (до процедуры исключения b). Видно, что в рассматриваемый период ясной погоды тестовые результаты W_t характеризуются существенно меньшей изменчивостью по сравнению с результатами, полученными по схемам С1–С4. При этом наибольшие вариации водозапаса наблюдаются для W_1 при семиканальных измерениях. Для двухканальных измерений вариации водозапаса для всех схем сопоставимы друг с другом по величине. Рис. 2 демонстрирует также, что для данного периода ясной погоды результаты, полученные по схеме С4, имеют остаточную систематическую погрешность, в то время как результаты, полученные по схемам С1, С2 и С3, практически не смещены относительно тестовых значений.

Таблица 2

Систематическая b и среднеквадратическая s погрешности (кг/м^2), а также коэффициент корреляции r_c для различных реализаций метода МЛР и различного количества спектральных каналов измерений, а также для различных диапазонов тестовых значений водозапаса W

Параметр	Количество спектральных каналов							
	7				2			
	Схема							
	С1	С2	С3	С4	С1	С2	С3	С4
$W < 0,4 \text{ кг/м}^2$								
b	0,013	0,005	0,004	0,000	-0,004	0,005	0,000	0,000
s	0,034	0,017	0,017	0,015	0,022	0,022	0,021	0,020
r_c	0,789	0,886	0,868	0,870	0,795	0,821	0,790	0,835
$W < 0,1 \text{ кг/м}^2$								
b	0,015	0,007	0,005	0,000	0,000	0,007	0,001	0,001
s	0,027	0,015	0,016	0,014	0,018	0,021	0,019	0,018
r_c	0,631	0,783	0,757	0,797	0,645	0,673	0,645	0,726
$0,1 < W < 0,4 \text{ кг/м}^2$								
b	0,007	0,001	0,002	-0,002	-0,024	-0,003	-0,003	-0,007
s	0,027	0,023	0,023	0,022	0,029	0,028	0,030	0,027
r_c	0,905	0,939	0,937	0,943	0,894	0,910	0,894	0,917

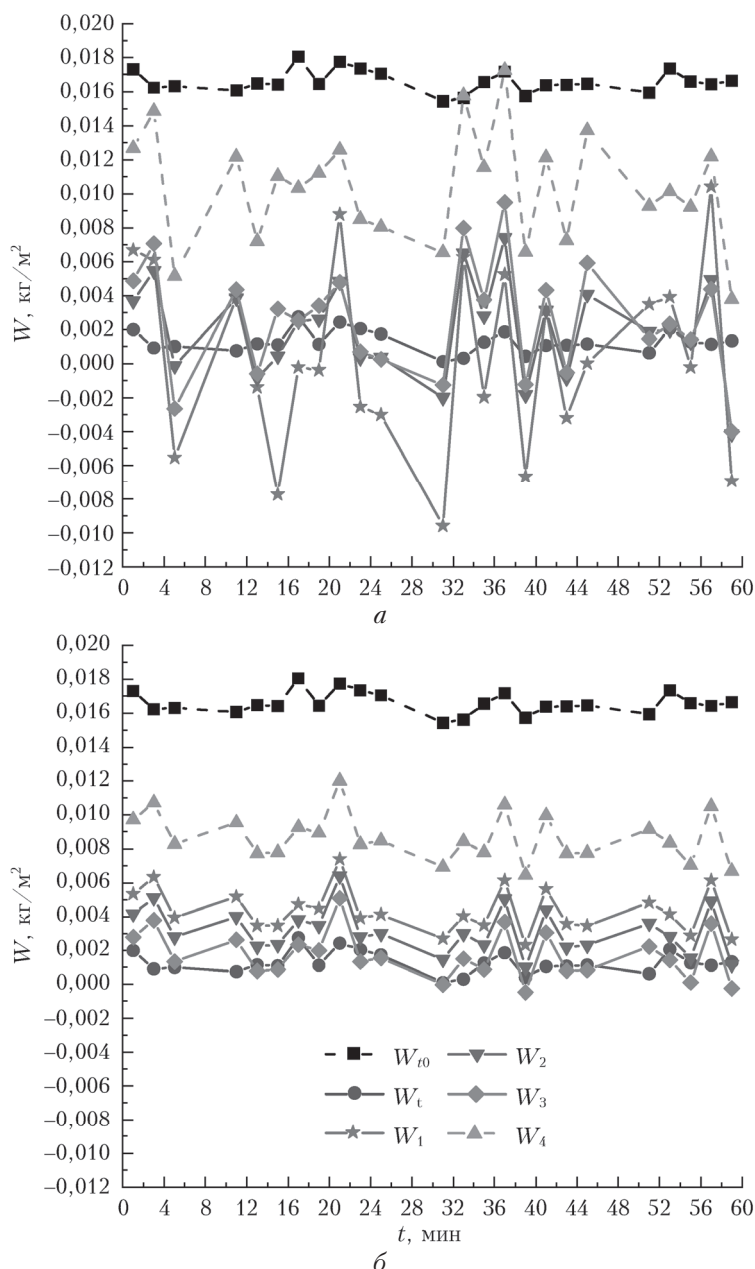


Рис. 2. Результаты определения водозапаса облаков при использовании различных схем расчета с 13:00 по 14:00 22.01.2014 г. (при отсутствии облачности): для семи (а) и двух (б) каналов

В трех описанных выше расчетных схемах (С1–С3) исключение систематической погрешности проводилось по значениям водозапаса в периоды ясной погоды, которые были определены по результатам, полученным методом ОУПИ [4]. Процедура заключалась в следующем: весь период наблюдений рассматривался как серия последовательных интервалов продолжительностью 1 ч. Для каждого интервала рассчитывались среднее значение водозапаса и стандартное отклонение. Интервалы с наименьшими значениями стандартного отклонения идентифицировались как безоблачные. Соответствующие средние значения водозапаса рассматривались как оценки систематической погрешности метода ОУПИ. В настоящей работе мы повторили эту процедуру,

используя в качестве исходных данных результаты, полученные по схемам С1–С3, но, естественно, до процедуры исключения систематической погрешности.

На рис. 3 полученные результаты представлены в виде зависимости среднего значения водозапаса от величины стандартного отклонения для 300 часовых интервалов. Очевидно, что чем компактнее по вертикали «облако» из точек вблизи начала координат, тем лучше для схемы работает критерий минимума вариаций получаемых значений водозапаса при ясной погоде. Для схемы С1 при семиканальных измерениях характерно самое широкое «облако». Этот результат соответствует сделанному выше выводу о больших погрешностях малых значений водозапаса при

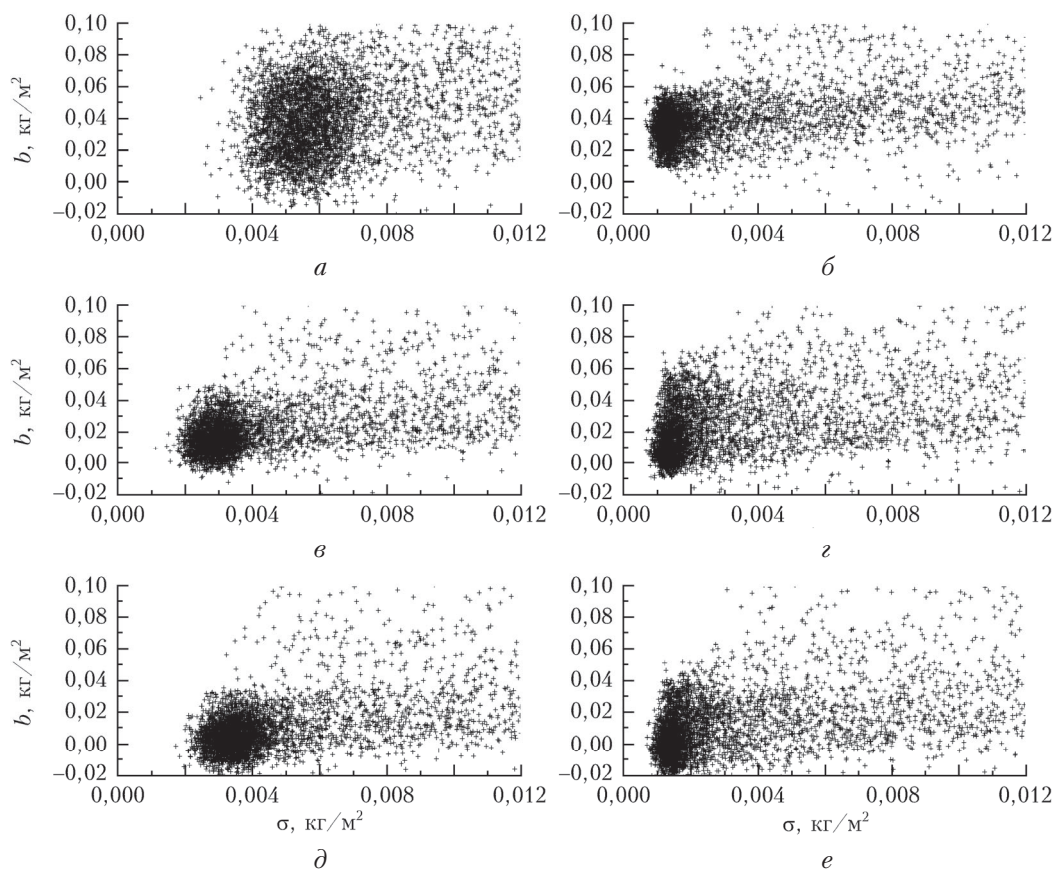


Рис. 3. Средние значения водозапаса b за 1 ч как функция стандартного отклонения водозапаса σ , рассчитанного за этот же период. Результаты для схем расчета С1 ($a, б$), С2 ($в, г$), С3 ($д, е$) для семи- ($a, в, д$) и двухканальных ($б, г, е$) измерений

использовании данной схемы и данного числа каналов. Для всех остальных случаев «облака» компактные, что свидетельствует о применимости критерия, при этом наименьшие вариации значений W наблюдаются для схемы С3 при семиканальных измерениях.

Для иллюстрации применимости критерия минимума вариаций W для определения периодов ясной погоды по значениям водозапаса облаков, полученным в линейных регрессионных алгоритмах, приведен рис. 4. В качестве эталона использованы периоды ясной погоды, определенные по методу ОУПИ. Как для семи-, так и для двухканальных измерений согласие между тестируемыми (схемы С2 и С3) и эталонными распределениями хорошее. Однако можно отдать некоторое предпочтение двухканальным измерениям, если обратить внимание на периоды с 40-го по 70-й, с 100-го по 160-й и с 250-го по 270-й день, в которых схемы С2 и С3 при семиканальных измерениях показывали наличие ясных периодов при отсутствии таковых в эталонных данных.

Заключение

Настоящая работа относится к исследованиям, направленным на усовершенствование методов определения водозапаса облаков по микроволновым измерениям с поверхности земли и на получение оце-

нок точности этих методов при различных условиях наблюдений. Основой проводимого исследования является большой массив результатов измерений нисходящего микроволнового излучения радиометром RPG-HATPRO на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета. Рассчитаны значения погрешности определения водозапаса облаков методом МЛР при использовании различных регрессионных соотношений, вычисленных как по модельным расчетам, так и по экспериментальным данным (во втором случае в качестве эталона были взяты результаты, полученные методом обращения уравнения переноса излучения). Показано, что при «обучении» метода МЛР по экспериментальным данным и использовании измерений в спектральных каналах радиометра случайная составляющая погрешности определения водозапаса равна 0,015–0,017 кг/м², что в 2 раза меньше, чем при обучении МЛР по результатам модельных расчетов. Систематическая составляющая погрешности при этом не превышает 0,005 кг/м². Продемонстрировано, что результаты метода МЛР, «обученного» по экспериментальным данным, позволяют надежно идентифицировать периоды ясной погоды по критерию минимума вариаций водозапаса.

На основании полученных результатов можно рекомендовать метод МЛР в качестве альтернативы методу множественной квадратической регрессии,

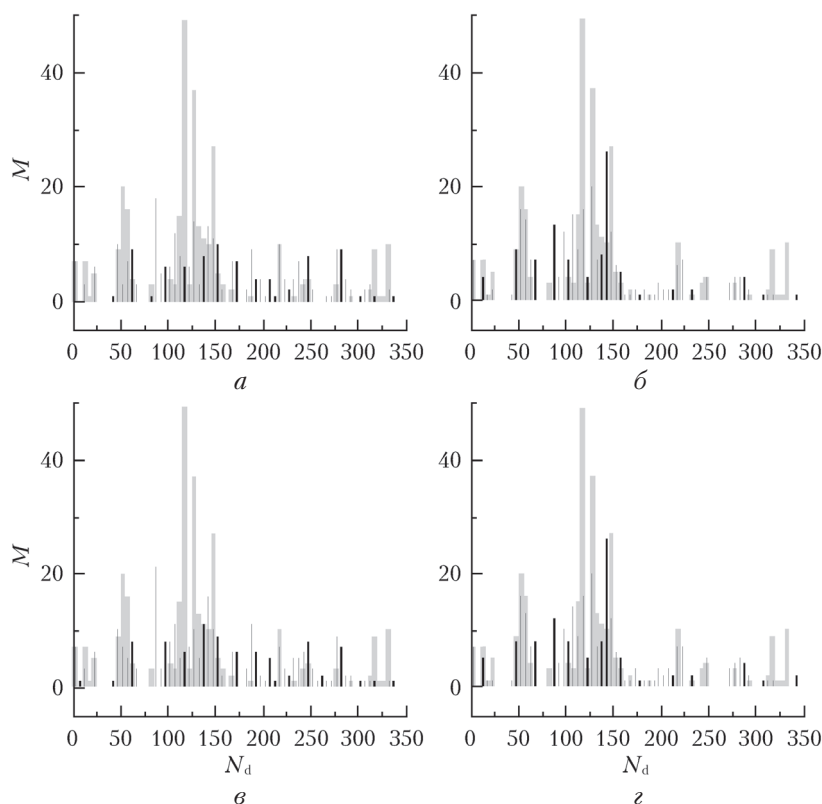


Рис. 4. Распределения безоблачных периодов в 2014 г. (N_d — номер дня), полученные по данным метода ОУПИ (серый цвет) и метода МЛР (черные линии). Гистограммы построены для временного интервала длительностью 5 сут. Показаны результаты для схем расчета С2 (а, б) и С3 (в, з) для семи- (а, в) и двухканальных (б, з) измерений

который при определенных условиях демонстрирует нестабильность систематической погрешности и проблемы с детектированием безоблачных состояний атмосферы. При этом для двухканальных радиометров метод МЛР можно рассматривать как основной, а для многоканальных радиометров, позволяющих решать многопараметрическую обратную задачу «физическим» методом на основе обращения уравнения переноса излучения, такой метод можно использовать для дополнительного контроля качества получаемых данных, а также в силу его простоты и высокого быстродействия для мониторинга водозапаса в реальном времени при максимальной частоте измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-00372). Функционирование измерительной аппаратуры обеспечивалось ресурсным центром «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета.

1. Westwater Ed., Crewell S., Mätzler C., Cimini D. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere // *Quaderni della Società Italiana di Elettromagnetismo*. 2005. V. 1, N 3. P. 50–90.
2. Maetzler C., Morland J. Refined physical retrieval of integrated water vapor and cloud liquid for microwave radiometer data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2009. V. 47, N 6. P. 1585–1594. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2006984.
3. Meijgaard E., Crewell S. Comparison of model predicted liquid water path with ground-based measurements

- during CLIWA-NET // *Atmos. Res.* 2005. V. 75, N 3. P. 201–226. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.12.006.
4. Kostov V.S., Ionov D.V., Biryukov E.Yu., Zaitsev N.A. Cross-validation of two liquid water path retrieval algorithms applied to ground-based microwave radiation measurements by the RPG-HATPRO instrument // *Int. J. Remote Sens.* 2018. V. 39, N 5. P. 1321–1342. DOI: 10.1080/01431161.2017.1404163.
5. Radiometer Physics. A Rohde and Schwarz Company. [Electronic resource]. URL: <https://www.radiometer-physics.de> (last access: 25.01.2019).
6. Rose T., Crewell S., Löhnert U., Simmer C. A Network suitable microwave radiometer for operational monitoring of the cloudy atmosphere // *Atmos. Res.* 2005. V. 75, N 3. P. 183–200. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.12.005.
7. Косцов В.С. Восстановление параметров облачной атмосферы по данным радиометра PRG-HATPRO // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2015. Т. 51, № 2. С. 179–190. DOI: 10.1134/S0001433815020085.
8. Thermodynamic Initial Guess Retrieval (TIGR) [Electronic resource]. URL: <http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/index.php?page=tigr> (last access: 25.01.2019).
9. Петербургский Нансен-центр [Electronic resource]. URL: <http://ru.niersc.spb.ru> (last access: 25.01.2019).
10. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М. Разработка и валидация алгоритмов восстановления скорости приводного ветра по данным SSM/I с применением Нейронных Сетей и физических ограничений // *Исслед. Земли из космоса*. 2000. № 2. С. 62–71.
11. Заболотских Е.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М., Черный И.В. О точности микроволновых спутниковых

- измерений скорости приводного ветра, влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2002. Т. 5, № 38. С. 592–600.
12. *Cimini D., Rosenkranz P.W., Tretyakov M.Y., Koshelev M.A., Romano F.* Uncertainty of atmospheric microwave absorption model: Impact on ground-based radiometer simulations and retrievals // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 15231–15259. DOI: 10.5194/acp-18-15231-2018.
 13. *Roebeling R.A., Placidi S., Donovan D.P., Russchenberg H.W.J., Feijt A.J.* Validation of liquid cloud property retrievals from SEVIRI using ground-based observations // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L05814. DOI: 10.1029/2007GL032115.
 14. *Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Точилкина Т.А.* Результаты исследований водозапаса облаков радиометрическим комплексом «Микрорадком» // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 6. С. 546–552; *Kadygrov E.N., Gorelik A.G., Tochilkina T.A.* Study of liquid water in clouds with the “Microradkom” radiometric system // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 4. P. 596–604.
 15. *Maetzler C.* Ground-based observations of atmospheric radiation at 5, 10, 21, 35, and 94 GHz // *Radio Sci.* 1992. V. 27. P. 403–415.

***E.Yu. Biryukov, V.S. Kostsov.* Application of linear regression methods based on model and experimental data to the retrieval of cloud liquid water path from ground-based microwave measurements.**

The 14-channel RPG-HATPRO microwave radiometer has been operating at the Faculty of Physics, St. Petersburg State University since 2012. It performs continuous measurements of the cloud liquid water path (LWP). Along with the multiple quadratic regression (MQR) method provided by the instrument manufacturer, the “physical” retrieval algorithm, which is based on the inversion of the radiative transfer equation (IRTE), and the multiple linear regression (MLR) method are used. The estimates of the LWP retrieval errors are presented for the cases when MLR coefficients are derived from model calculations and from the experimental data (in the latter case, the IRTE results are used as reference data). It is shown that the application of the experimental data and the utilization of measurements in 7 spectral channels of the radiometer provide the LWP random error of 0.015–0.017 kg/m² which is two times lower than in case of derivation of regression coefficients from model calculations. The bias does not exceed 0.005 kg/m² in this case. It is demonstrated that the MLR results provide a reliable identification of clear-sky conditions if the criterion of minimal LWP variations is applied.