

УДК 551.501.776

# Применение регрессионного алгоритма к задаче исследования горизонтальной неоднородности водозапаса облаков по наземным микроволновым измерениям в режиме углового сканирования

Е.Ю. Бирюков, В.С. Косцов\*

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

Поступила в редакцию 3.04.2020 г.

Представлены результаты определения градиента водозапаса облаков «суша – море» из наземных измерений нисходящего микроволнового излучения в области береговой линии Финского залива в окрестностях Санкт-Петербурга. Измерения осуществлялись на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета радиометром RPG-NATPRO, работающим в режиме углового сканирования. Обратная задача решалась методом линейной регрессии с использованием различных статистических моделей облачности для обучения алгоритма. Получены средние за 7 лет микроволновых измерений значения градиента водозапаса для лета и зимы. Результаты показали наличие положительного градиента водозапаса облаков «суша – море» (большие значения над сушей, меньшие – над морем) в оба периода, что качественно согласуется с имеющимися спутниковыми данными.

*Ключевые слова:* водозапас облаков, тропосфера, горизонтальные неоднородности параметров атмосферы, дистанционное зондирование, микроволновый радиометр, обратные задачи, регрессионный алгоритм; cloud liquid water path, troposphere, horizontal inhomogeneity of atmospheric parameters, remote sensing, microwave radiometer, inverse problems, regression algorithm.

## Введение

Облака – это важный компонент гидрологического цикла и климатической системы «земля – атмосфера – океан» в целом [1]. В средних и высоких широтах существенную роль в изменении климата может играть взаимовлияние облаков и снежного покрова. В [2] на основе модельных расчетов показано, что скорость таяния снега возрастает при наличии тонких облаков и уменьшается при наличии толстых облаков с большим водозапасом. Результаты модельных расчетов влияния облачности на толщину льда в Арктике представлены в [3].

Одной из основных характеристик облаков и одновременно одним из ключевых атмосферных параметров является водозапас. Мониторинг водозапаса облаков в глобальном масштабе осуществляется с помощью дистанционных измерений спутниковыми приборами, работающими в различных спектральных диапазонах [4–6]. Для локальных наземных дистанционных измерений используются в основном микроволновые радиометры [7].

При изучении водозапаса облаков в ряде исследований были отмечены существенные различия

в его значениях над сушей и водной поверхностью в Северной Европе. В [8] были получены характеристики облачности скандинавского региона за 1991–2000 гг. по данным прибора AVHRR, установленного на спутниках NOAA. Были обнаружены существенные вариации облачности локальных масштабов. Весной и летом, в отличие от зимы и осени, над поверхностью моря и больших озер наблюдалось существенно меньше облаков, чем над сушей. Было выдвинуто предположение, что из-за таяния снегов и притока талой воды имеет место очень низкая температура поверхности моря и озер. Это приводит к существенной стабилизации приповерхностного слоя тропосферы и к подавлению процессов облакообразования.

Исследования различий в значениях водозапаса над сушей и водной поверхностью на севере Европы немногочисленны. Помимо [8], следует упомянуть работы [9, 10], в которых на основе анализа данных, полученных спутниковыми приборами SEVIRI и AVHRR, были отмечены различия в значениях водозапаса облаков над водными объектами северо-запада Российской Федерации и прилегающей сушей не только в теплый, но и в холодный сезон, когда поверхность покрыта снегом и льдом. Поэтому вопрос о физических механизмах этих различий требует дальнейших исследований. Следует также отметить, что интерес к рассматриваемой проблеме

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

обусловлен и другими причинами, среди которых важное место занимает необходимость совершенствования региональных климатических моделей для учета процессов взаимодействия подстилающей поверхности и атмосферы.

В [11] рассматривалась задача определения горизонтальных градиентов водозапаса облаков в области береговой линии по измерениям нисходящего микроволнового (МКВ) излучения радиометром, работающим в режиме углового сканирования в вертикальной плоскости в направлении на море. Основой этой работы были долговременные измерения на кафедре физики атмосферы физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета с 2012 г., которые проводились с помощью 14-канального МКВ-радиометра RPG-HATPRO (прибор находится на расстоянии 2,5 км от побережья Финского залива). Было показано, что поставленная задача достаточно сложна, а также были проанализированы проблемы, касающиеся выбора сценариев наблюдений, пространственной ориентации прибора и геометрии измерений, алгоритмов обработки данных и процедур контроля качества данных. В частности, было указано, что, поскольку задача представляет собой статистическую оценку малой разности двух больших случайных (в общем случае) величин, к точности алгоритма определения водозапаса облаков из значений измеряемой яркостной температуры МКВ-излучения предъявляются повышенные требования. Настоящая работа посвящена поиску путей решения указанной проблемы, а именно исследованию различных способов настройки («обучения») регрессионного алгоритма определения водозапаса по микроволновым измерениям при различных углах наблюдений. Аналогичная задача для МКВ-измерений в зенит была рассмотрена ранее [12].

## Используемые данные и сценарии расчетов

Задача обнаружения горизонтального градиента водозапаса облаков «суша – море» в области береговой линии сформулирована и подробно проанализирована в [11]. Приведем описание задачи в кратком виде:

1. Исходные данные – измерения яркостной температуры МКВ-излучения при 8 зенитных углах визирования ( $0^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $70,8^\circ$ ;  $75,6^\circ$ ;  $78,6^\circ$ ;  $81,6^\circ$ ;  $83,4^\circ$ ;  $85,2^\circ$ ). Измерения в режиме углового сканирования проводятся с помощью расположенного на расстоянии 2,5 км от береговой линии радиометра RPG-HATPRO постоянно в течение нескольких лет с временным интервалом 20 мин (при этом измерения в зенитном направлении следуют с интервалом 1–2 с, длительность перерывов на угловое сканирование – 5 мин). Поскольку угловое сканирование осуществляется в направлении на Финский залив, измеряемое излучение несет информацию о параметрах атмосферы над этим водным объектом. Подробное описание радиометра можно найти в [13] и на сайте производителя этой аппаратуры [14].

2. Сравнивая статистические средние значения водозапаса облаков, полученные при различных углах визирования, со значениями, полученными для измерений в зенит, можно оценить наличие и величину градиента водозапаса облаков «суша – море». Важно подчеркнуть, что, в силу очень больших пространственно-временных вариаций облачности и их случайного характера для измерений локального масштаба, решение задачи для единичных наблюдений (один угловой скан) не имеет смысла.

3. В качестве метода определения значений водозапаса облаков предложено использовать линейный регрессионный алгоритм и измерения яркостной температуры в спектральных каналах 22,24 и 31,4 ГГц (такой подход давно и широко применяется в практике обработки микроволновых измерений). Подчеркнем, что спектральные измерения рассматриваются отдельно для каждого из углов визирования.

Ключевой момент – так называемое «обучение» регрессионного алгоритма, т.е. определение регрессионных коэффициентов. В настоящей работе мы анализируем применимость нескольких различных статистических моделей облачности в комбинации с набором профилей метеопараметров (температура, давление, влажность) для обучения алгоритма с целью выбора оптимальной модели. Настоящая работа включает 4 этапа: компиляция статистических моделей, обучение алгоритма, проведение численных экспериментов, обработка результатов измерений за большой промежуток времени. Во всех расчетах использовалось приближение горизонтальной однородности значений температуры, давления и влажности. Основу для «обучающих» моделей составили 167045 наборов, включающих профили давления, температуры и влажности в тропосфере, полученных по МКВ-измерениям RPG-HATPRO в зенитном направлении в период с декабря 2012 по ноябрь 2013 г. с шагом по времени 2 мин. Основу для «тестовых» моделей составили 43710 наборов профилей, полученных с июня по август 2017 г. с шагом по времени 2 мин. Таким образом, для обучения использовались метеоусловия всех сезонов, а для тестирования был выбран летний сезон. Каждую из моделей облачности рассмотрим отдельно.

1. **Модель М1.** Описывается сплошная горизонтально однородная облачность. Модель основана на экспериментальных данных. В качестве профиля водности и водозапаса облаков используются результаты, полученные по данным измерений RPG-HATPRO в зенитном направлении с декабря 2012 по ноябрь 2013 г. с шагом по времени 2 мин. Напомним, что вертикальное разрешение микроволнового метода крайне низкое и погрешности задания профиля водности практически не влияют на получаемые результаты. Основными наиболее информативно обеспеченными параметрами при МКВ-зондировании тропосферы являются интегральное содержание водяного пара и водозапас облаков (только жидкокапельная фракция).

2. **Модели М2 (М2<sub>f</sub> и М2<sub>m</sub>).** Описывается несплошная облачность: отдельные, рассеянные и ра-

зорванные облака. Подчеркнем, что мы использовали упрощенную модель, поэтому ниже для удобства будем употреблять один термин «рассеянная облачность». Модели основаны на методе разыгрывания случайных величин. Как показано на рис. 1, *a*, в плоскости углового сканирования радиометра рассматривалось 10 пространственных ячеек размером  $12 \times 3,25$  км, в каждой из которых с помощью генератора случайных чисел (метод Монте-Карло) разыгрывались значения следующих параметров одного облака: вертикальной протяженности (от 0,3 до 2 км, равномерное распределение), горизонтальной протяженности (от 0,5 до 5 км, равномерное распределение), положения центра облака в ячейке (равномерное распределение) и водозапаса (логнормальное распределение с одним и тем же средним значением  $W = 0,08$  кг/м<sup>2</sup> над сушей и морем). Размеры облаков были выбраны в соответствии с классификацией [15]. Водность в облаке предполагалась постоянной по высоте и рассчитывалась из значений водозапаса. Поскольку описываются рассеянные облака, модель M2 использовалась в двух видах (M2<sub>f</sub> и M2<sub>m</sub>) в зависимости от способа расчета водозапаса, соответствующего единичной реализации состояния атмосферы. В модели M2<sub>f</sub> для каждого угла визирования водозапас  $W$  определялся как сумма водозапаса всех фрагментов облаков, попавших в поле зрения:

$$W_f = \sum_{k=1}^K w_k, \quad (1)$$

где индекс *f* указывает, что рассматриваются фрагменты облаков; *k* – номер фрагмента облака; *K* – общее число фрагментов;  $w$  – водозапас фрагмента облака. На рис. 1, *b* приведены различные варианты пересечения облаков траассой распространения излучения. Во всех расчетах мы использовали водозапас, приведенный к значению, получаемому при интегрировании по вертикали. В модели M2<sub>m</sub> для всех углов визирования, кроме зенитного направления, значение водозапаса было одинаковым и равным среднему значению по всем облакам, находящимся над водной поверхностью, а при наблюдениях в зенит водозапас принимался равным среднему значению по всем облакам, находящимся над сушей (над берегом, где расположен радиометр). Использовалась формула

$$W_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_n, \quad (2)$$

где индекс *m* указывает, что это среднее значение; *n* – номер облака; *N* – общее количество облаков над водной поверхностью (или сушей);  $w$  – водозапас отдельного облака. Идентификация положения

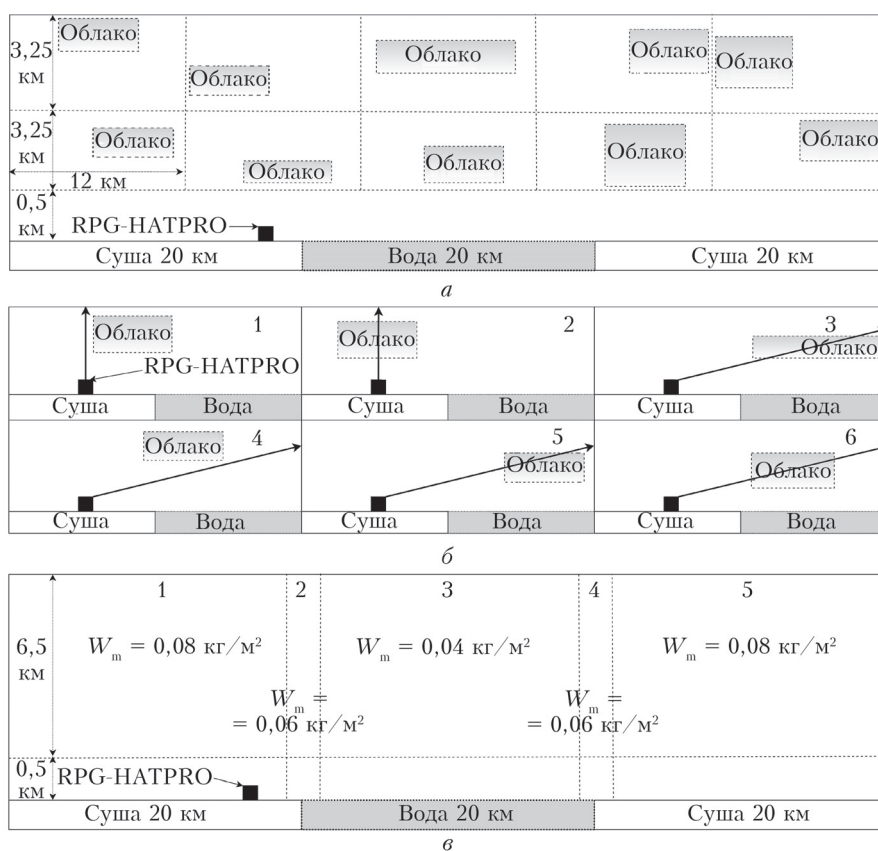


Рис. 1. Статистическое моделирование облачности: *a* – расположение пространственных ячеек с облаками относительно суши и водной поверхности; *b* – возможные варианты пересечения облаков оптической траассой распространения излучения; *c* – средние значения водозапаса в выделенных пространственных областях (суша, вода, прибрежная область).

Для наглядности рисунки выполнены без соблюдения масштабов; черный квадрат – точка расположения радиометра

облака над сушей или морем осуществлялась по положению его центра. Компилируя модель  $M2_m$ , мы преследовали цель воспроизвести в первом приближении спутниковые измерения водозапаса, которые дают среднее значение водозапаса в пространственной области масштаба нескольких километров (наземный пиксель спутникового изображения).

3. **Модели МЗ ( $M3_f$  и  $M3_m$ ).** Описывается рассеянная облачность. Модели основаны на методе разыгрывания случайных величин. Они полностью идентичны моделям  $M2_f$  и  $M2_m$ , за исключением того, что среднее значение водозапаса облака при разыгрывании определяется положением облака: над сушей, морем или береговой линией. Эти пространственные области приведены на рис. 1, в, там же – соответствующие средние значения водозапаса облаков. Повторим, что положение облака над той или иной областью поверхности идентифицировалось по положению его центра.

4. **Модели МТ ( $MT_f$  и  $MT_m$ ).** Тестовые модели, скомпилированные аналогично моделям  $M3_f$  и  $M3_m$ . Наборы метеопараметров для тестовых моделей соответствовали летним условиям, в то время как обучение алгоритма проводилось на наборах метеопараметров для всех сезонов.

Резюмируя вышесказанное, используемые модели можно кратко описать следующим образом:  $M1$  – сплошная облачность без градиента водозапаса «суша – море»;  $M2$  – рассеянная облачность без градиента водозапаса;  $M3$  и  $MT$  – рассеянная облачность с градиентом водозапаса; индекс  $f$  указывает на модель, где осуществляется точный расчет водозапаса по трассе распространения излучения; индекс  $m$  указывает, что в качестве водозапаса использовано среднее значение для всех облаков над водной поверхностью и над сушей в области расположения радиометра (упрощенное моделирование спутниковых измерений).

Подводя итоги раздела, укажем, что расчеты яркостной температуры при обучении алгоритма и в численных экспериментах проводились с использованием свободно распространяемого компьютерного кода [16]. Обучение алгоритма проводилось отдельно для каждого угла визирования. Все расчеты, в которых значение водозапаса превышало  $0,4 \text{ кг/м}^2$ , отбрасывались, поскольку это значение считается пороговым при переходе от недождящих облаков к дождящим [17].

## Результаты численного эксперимента

Прежде чем анализировать результаты, необходимо оценить соотношение моделей облачности с индексами  $f$  и  $m$ . На рис. 2 приведены средние значения водозапаса  $W_f$  (формула (1)) для моделей  $M2_f$  и  $M3_f$  в зависимости от угла визирования  $\gamma$ . В силу того, что моделируется рассеянная облачность и оптические трассы могут пересекать малые фрагменты облаков либо не пересекать их вообще, значения водозапаса существенно ниже, чем средние значения для моделей  $M2_m$  и  $M3_m$  (средние при

моделировании). Обращает на себя внимание локальный максимум водозапаса при  $\gamma = 78,6^\circ$ . В модели  $M2_f$  градиент водозапаса «суша – море» отсутствует, поэтому локальный максимум будет указывать на угол визирования, при котором в поле зрения будет попадать наибольшее число облаков. Отметим, что при этом в поле зрения могут оказаться и облака над противоположным берегом, что подтверждается быстрым сближением значений водозапаса для моделей  $M2_f$  и  $M3_f$  при  $\gamma \geq 78,6^\circ$ . Исходя из результатов, приведенных на рис. 2, мы выбрали для дальнейшего анализа результаты, полученные для углов визирования  $60^\circ$  и  $78,6^\circ$ .

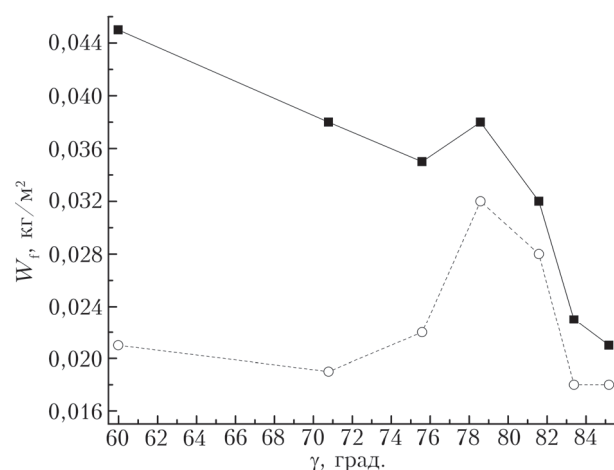


Рис. 2. Средние значения водозапаса облаков  $W_f$  (см. (1)) для моделей  $M2_f$  (квадраты) и  $M3_f$  (кружки) в зависимости от зенитного угла наблюдений

Результаты численных экспериментов иллюстрирует рис. 3, на котором даны двумерные частотные распределения тестовых значений водозапаса (модели  $MT_f$ ,  $MT_m$ ) и полученных методом линейной регрессии (МЛР) значений водозапаса при угле визирования  $78,6^\circ$  при обучении МЛР по моделям  $M3_f$ ,  $M3_m$ . Из представленных четырех сочетаний моделей «обучение – тест» МЛР хорошо работает только для пары  $M3_f$  –  $MT_f$  (рис. 3, а). Ввиду отсутствия корреляции между значениями водозапаса  $W_f$  и  $W_m$ , модель с индексом  $m$ , симулирующая спутниковые данные, не подходит в качестве обучающей (рис. 3, в, з). Рис. 3, б подтверждает известный вывод о том, что прямое сопоставление наземных и спутниковых данных невозможно, необходимо проводить временное усреднение наземных данных.

Характеристики точности МЛР представлены в табл. 1 для случая рассеянной облачности и в табл. 2 для случая сплошной облачности. Здесь и далее мы уже не рассматриваем обучение и тестирование с использованием моделей, симулирующих спутниковые измерения. Из сравнения данных в табл. 1 и 2 видно, что наименьшие систематические и случайные погрешности имеют место для случая сплошной облачности. Систематическую погрешность можно считать пренебрежимо малой, по абсолютному значению она не превышает  $0,003 \text{ кг/м}^2$ .

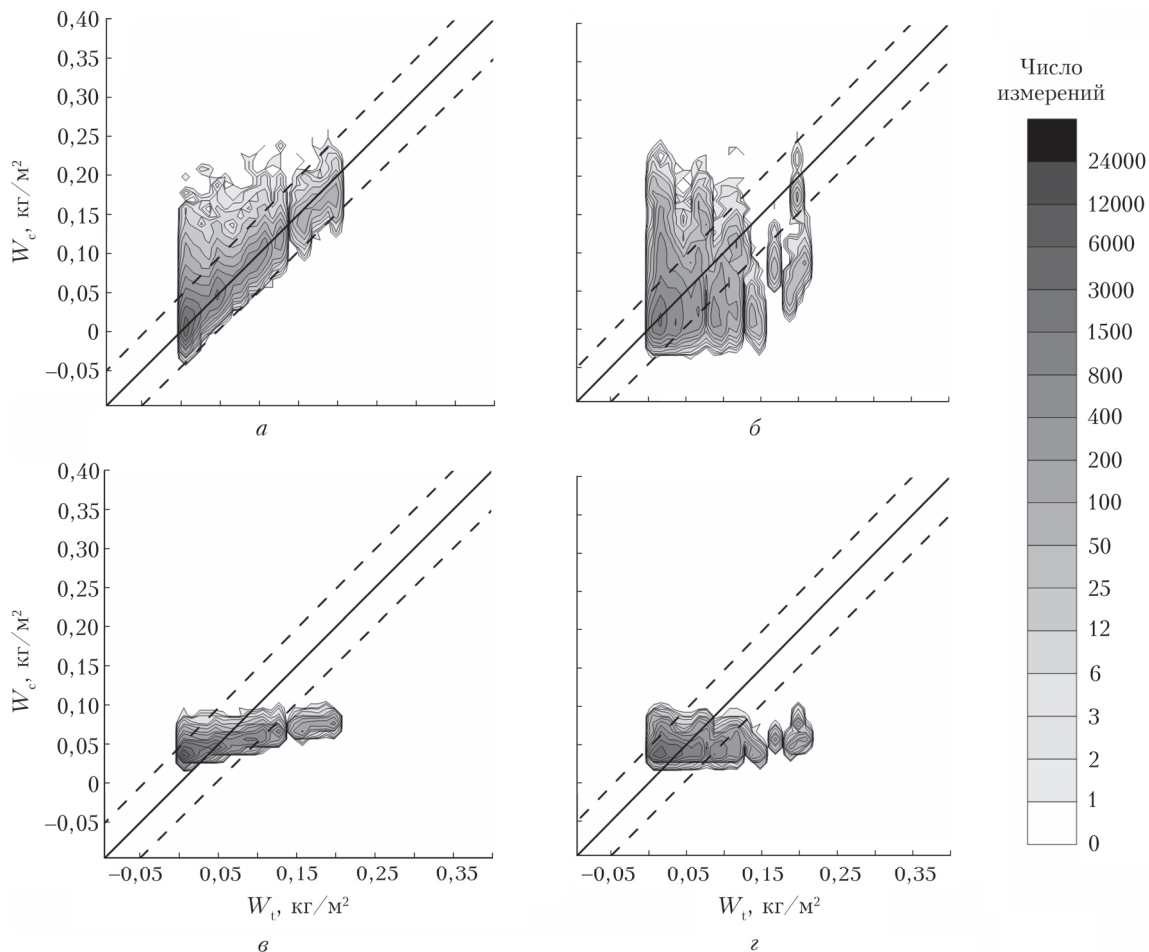


Рис. 3. Двумерное частотное распределение значений водозапаса, полученных в численных экспериментах ( $W_c$ ), и соответствующих тестовых значений водозапаса облаков ( $W_t$ ) для сочетаний моделей «обучение – тест»: а – МЗ<sub>f</sub> – МТ<sub>f</sub>; б – МЗ<sub>f</sub> – МТ<sub>m</sub>; в – МЗ<sub>m</sub> – МТ<sub>f</sub>; г – МЗ<sub>m</sub> – МТ<sub>m</sub>;  $\gamma = 78,6^\circ$

Случайная погрешность сопоставима с ранее полученными результатами для измерений в зенитном направлении [12]. В ситуации с рассеянной облачностью полученные значения водозапаса систематически превышают истинные на  $0,006–0,014 \text{ кг/м}^2$ . Случайная погрешность составляет от  $0,021$  до  $0,030 \text{ кг/м}^2$ . Отметим, что как систематическая, так и случайная погрешности несколько возрастают с увеличением угла визирования. По результатам численных экспериментов, из трех обучающих моделей (М1, М2<sub>f</sub> и М3<sub>f</sub>) незначительным преимуществом обладает модель М3<sub>f</sub>.

Таблица 1

**Результаты численного эксперимента для тестовой модели МТ1, описывающей рассеянную облачность (полученное среднее значение водозапаса  $W_c$ , среднее значение водозапаса тестовой модели  $W_t$ , среднеквадратическая погрешность определения водозапаса  $\sigma$ ; все результаты даны в  $\text{кг/м}^2$ )**

Обучающая модель	Угол визирования					
	60°			78,6°		
	$W_c$	$W_t$	$\sigma$	$W_c$	$W_t$	$\sigma$
М1	0,032		0,025	0,046		0,030
М2 <sub>f</sub>	0,029	0,021	0,023	0,043	0,032	0,026
М3 <sub>f</sub>	0,027		0,022	0,040		0,024

Таблица 2

**Аналогично табл. 1, но в качестве тестовой модели использована модель сплошной облачности М1**

Обучающая модель	Угол визирования					
	60°			78,6°		
	$W_c$	$W_t$	$\sigma$	$W_c$	$W_t$	$\sigma$
М2 <sub>f</sub>	0,056	0,053	0,014	0,053	0,053	0,015
М3 <sub>f</sub>	0,052		0,013	0,051		0,016

Как было отмечено выше, в силу очень больших пространственно-временных вариаций облачности и их случайного характера решение задачи для единичных наблюдений (один угловой скан) не имеет смысла. Мы будем анализировать средние значения, полученные для массивов, которые содержат большое количество данных – порядка нескольких тысяч. Очевидно, что при таком усреднении случайная составляющая погрешности среднего значения будет существенно подавлена и станет пренебрежимо малой – порядка  $0,0005 \text{ кг/м}^2$ . Что касается систематической составляющей, отметим три момента.

1. Как показали численные эксперименты, систематическая составляющая погрешности при наблюдении в зенит сравнима по величине и одинакова

по знаку с систематической погрешностью при наблюдении на наклонных трассах. Поскольку будет анализироваться разность между значениями водозапаса, полученными при наблюдении в зенитном направлении и на наклонных трассах, то систематическая погрешность этой разности будет на порядок меньше, чем систематическая составляющая погрешности самого водозапаса.

2. Для сплошной облачности систематическая погрешность очень мала, для рассеянной — заметно выше. В качестве разумной оценки применительно к реальным данным можно взять среднее значение этих погрешностей, что для модели МЗ<sub>f</sub> и  $\gamma = 78,6^\circ$  составит  $0,006 \text{ кг/м}^2$ . Для разности значений водозапаса в соответствии с нашими расчетами значение систематической погрешности будет на порядок меньше ( $0,0006 \text{ кг/м}^2$ ); округлив до большего значения, получим  $0,001 \text{ кг/м}^2$ .

3. Как показали численные эксперименты, систематическая погрешность при наклонных трассах увеличивается по сравнению с зенитным направлением визирования. При этом получаемые значения водозапаса завышены. Поэтому средние значения разности водозапаса будут занижены по сравнению с истинными на величину  $0,001 \text{ кг/м}^2$ .

Выводы 1–3 относятся к сопоставлению результатов численного эксперимента и тестовых значений водозапаса при использовании конкретной модели для обучения и в предположении о том, что эта модель оптимальна. Однако важную роль играет и систематическая погрешность, обусловленная спецификой обучающей модели. В отличие от обсуждавшейся выше систематической компоненты эта погрешность не компенсируется при расчете разности значений водозапаса. Из данных табл. 1 можно получить ее оценку, взяв максимальную разность между значениями  $W_c$ , соответствующими различным моделям. Такая оценка дает величину  $0,006 \text{ кг/м}^2$ . При обработке экспериментальных данных знак этой погрешности не определен, поскольку невозможно оценить степень соответствия обучающей модели многообразию реальных условий.

## Результаты обработки измерений

Алгоритм линейной регрессии, обученный по моделям М1, М2<sub>f</sub> и МЗ<sub>f</sub>, был использован для определения водозапаса облаков по данным микроволновых измерений в каналах 22,24 и 31,4 ГГц радиометра НАТPRO при углах визирования 0, 60 и  $78,6^\circ$ . Были использованы измерения в периоды: декабрь — февраль в 2013–2020 гг., апрель — август в 2013–2019 гг. Число измерений варьировалось от 2755 до 6228. Анализировались значения градиента водозапаса облаков «суша — море», в качестве которого рассматривалась разность

$$D_W(\gamma) = W_0 - W(\gamma), \quad (3)$$

где  $W_0$  — водозапас, полученный по измерениям в зенит;  $W(\gamma)$  — водозапас, полученный по измерениям при зенитном угле визирования  $\gamma$  ( $60^\circ$  или

$78,6^\circ$ ). Погрешность определения средних значений этой величины составляет, согласно оценке, приведенной в предыдущем разделе,  $0,006 \text{ кг/м}^2$ . На рис. 4 эта погрешность не показана, чтобы не усложнять восприятие (отрезки погрешностей для точек различных кривых накладываются друг на друга и становятся неразличимыми).

На рис. 4, а, б представлена межгодовая изменчивость средних зимних градиентов водозапаса для 2013–2019 гг., полученных с помощью алгоритмов М1, М2<sub>f</sub> и МЗ<sub>f</sub> (здесь и ниже для краткости название алгоритма соответствует модели, по которой этот алгоритм был обучен). Наблюдаются как положительные, так и отрицательные градиенты. Результаты, полученные с использованием различных алгоритмов, могут систематически отличаться на величину до  $0,010 \text{ кг/м}^2$ , сопоставимую с вышеприведенной оценкой погрешности. При угле визирования  $78,6^\circ$  отрицательные градиенты выражены сильнее, что может, в частности, объясняться влиянием облачности, расположенной над противоположным берегом Финского залива. Очень важно отметить, что два локальных максимума в 2014 и 2020 гг. соответствуют аномально теплым зимам в районе Санкт-Петербурга (гидрометеорологические обзоры для этих сезонов доступны по ссылке [18]). Далее мы будем рассматривать только результаты, полученные по алгоритму МЗ<sub>f</sub>, поскольку его обучение проводилось для условий, подтвержденных спутниковыми наблюдениями, т.е. при наличии градиента водозапаса «суша — море». Важно подчеркнуть, что использование этой модели не означает автоматическое получение соответствующего градиента и при обработке экспериментальных данных. Обучение алгоритма проводилось, во-первых, относительно значений водозапаса, а не его градиента «суша — море», во-вторых — для каждого из углов визирования отдельно. Преимущество указанной модели обусловлено тем фактом, что для каждого из углов обучение проводилось на ансамбле с максимальным числом наиболее вероятных значений водозапаса для реальных условий.

Внутрисезонная (весна — лето) изменчивость градиента водозапаса для разных лет наблюдений приведена на рис. 4, в, г. Видно, во-первых, что все значения положительны (за исключением значения за июль 2018 г.). Во-вторых, значения градиента весной — летом в целом заметно больше, чем зимой. Обращает на себя внимание тот факт, что для всех лет наблюдений в июне отмечается локальный минимум градиента водозапаса. Результат усреднения внутрисезонного (весна — лето) хода градиента по всем годам приведен на рис. 4, д, где для обоих углов визирования четко видны локальный минимум в июне и два локальных максимума в конце весны и лета. Временной ход градиента водозапаса мы дополнили информацией о временном ходе самой величины водозапаса. На рис. 4, е приведены среднемесячные значения водозапаса, усредненные также по всем годам наблюдений, которые получены для трех зенитных углов визирования. Медленное увеличение водозапаса наблюдается с апреля по июнь,

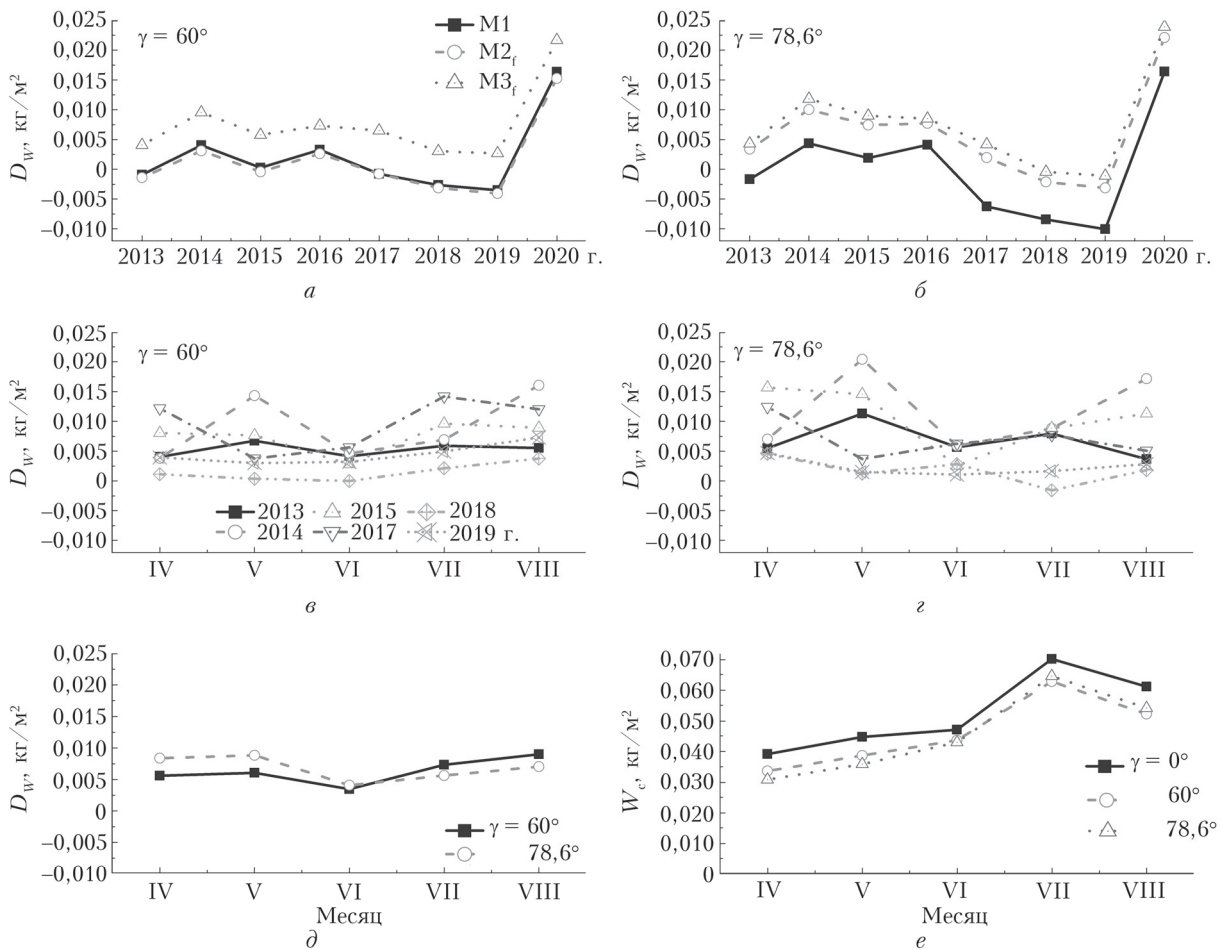


Рис. 4. Результаты обработки МКВ-измерений: межгодовая изменчивость средних зимних градиентов водозапаса (а, б) и внутрисезонная (весна – лето) изменчивость среднемесячных значений градиента водозапаса (в, з) при  $\gamma = 60$  и  $78,6^\circ$ ; внутрисезонный (весна – лето) ход градиента водозапаса (д) и среднемесячные значения водозапаса (е), усредненные по всем годам наблюдений; а, б – результаты полученные с помощью алгоритмов M1, M2<sub>f</sub> и M3<sub>f</sub>; в, з, д, е – с помощью алгоритма M3<sub>f</sub>

затем следует резкий рост и локальный максимум в июле (достигающий  $0,070 \text{ кг/м}^2$ ). В июле в Санкт-Петербурге отмечается наиболее высокая среднемесячная температура. Средний водозапас облаков в июле примерно в 1,8 раза больше, чем в апреле. Учитывая временной ход водозапаса, можно предположить, что максимум градиента «суша–море» весной объясняется пониженным облакообразованием над водой ввиду стабилизации приповерхностного слоя над холодной водной поверхностью (согласно выводам [8]), а второй максимум в конце лета обусловлен интенсивным облакообразованием над сушей из-за ее существенного разогрева.

### Заключение

Настоящая работа посвящена определению водозапаса облаков по спектрально-угловым МКВ-измерениям с поверхности земли в рамках решения задачи исследования горизонтальной неоднородности водозапаса облаков над сушей и прилегающей к ней водной поверхностью. Основой исследования были массивы результатов измерений нисходящего

МКВ-излучения аппаратурой RPG-HATPRO, проводившихся на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета в 2012–2019 гг. Радиометр расположен в 2,5 км от берега Финского залива и осуществляет угловое сканирование в направлении этого водного объекта. В ходе численного эксперимента была оценена точность линейного регрессионного алгоритма определения водозапаса по измерениям в двух спектральных каналах 22,24 и 31,4 ГГц при различных углах визирования. Алгоритм был обучен на различных статистических моделях облачности. Результаты обработки измерений RPG-HATPRO показали наличие положительного градиента водозапаса облаков «суша–море» (большие значения над сушей, меньшие – над морем) как летом, так и зимой, что качественно согласуется с имеющимися спутниковыми данными. Зимой градиент по абсолютной величине меньше, чем летом, кроме того, наблюдаются и отрицательные значения. Межгодовой разброс весенне-летних величин градиента водозапаса значительный для всех месяцев, кроме июня. В июне имеет место минимум в значениях градиента, максимумы

наблюдаются в конце весны и лета. Усредненные за несколько лет значения градиента водозапаса облаков находятся в пределах 0,005–0,010 кг/м<sup>2</sup>, погрешность определения среднего значения градиента на основе больших рядов наблюдений была оценена как 0,006 кг/м<sup>2</sup>.

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

1. *Stephens G.L.* Cloud feedbacks in the climate system: a critical review // *J. Climate*. 2015. V. 18. P. 237–273. DOI: 10.1175/JCLI-3243.1.
2. *Zhang T., Starnes K., Bowling S.A.* Impact of clouds on surface radiative fluxes and snowmelt in the Arctic and Subarctic // *J. Climate*. 1996. V. 9. P. 2110–2123.
3. *Beesley J.A.* Estimating of the effect of clouds on the arctic surface energy budget // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N D8. P. 10103–10117.
4. *Remote Sensing Systems*. [Electronic resource] URL: <http://remss.com/measurements/cloud-liquid-water-content> (last access: 3.03.2020).
5. *Stengel M., Kniffka A., Meirink J.F., Lockhoff M., Tan J., Hollmann R.* CLAAS: the CM SAF cloud property data set using SEVIRI // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 4297–4311. DOI: 10.5194/acp-14-4297-2014.
6. *Stengel M., Sus O., Stapelberg S., Schlundt C., Poulsen C., Hollmann R.* ESA cloud climate change initiative (ESA Cloud cci). Data: Cloud\_cci AVHRR-PM L3C/L3U CLD\_PRODUCTS v2.0, Deutscher Wetterdienst (DWD). 2017. [Electronic resource] URL: [https://doi.org/10.5676/DWD/ESA\\_Cloud\\_cci/AVHRR-PM/V002](https://doi.org/10.5676/DWD/ESA_Cloud_cci/AVHRR-PM/V002).
7. *Westwater E.R., Crewell S., Mätzler C.* A Review of surface-based microwave and millimeter-wave radiometric remote sensing of the troposphere // *Radio Sci. Bull.* 2004. N 310. P. 59–80. DOI: 10.23919/URSIRSB.2004.7909438.
8. *Karlsson K.* A 10 year cloud climatology over Scandinavia derived from NOAA advanced very high resolution radiometer imagery // *Int. J. Climatol.* 2003. V. 23. P. 1023–1044. DOI: 10.1002/joc.916.
9. *Kostsov V.S., Kniffka A., Ionov D.V.* Cloud liquid water path in the sub-Arctic region of Europe as derived from ground-based and space-borne remote observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11. P. 5439–5460. DOI: 10.5194/amt-11-5439-2018.
10. *Kostsov V.S., Kniffka A., Stengel M., Ionov D.V.* Cross-comparison of cloud liquid water path derived from observations by two space-borne and one ground-based instrument in northern Europe // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 5927–5946. DOI: 10.5194/amt-12-5927-2019.
11. *Kostsov V.S., Ionov D.V., Kniffka A.* Detection of the cloud liquid water path horizontal inhomogeneity in a coastline area by means of ground-based microwave observations: Feasibility study // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2020. DOI: 10.5194/amt-2020-52.
12. *Бирюков Е.Ю., Косцов В.С.* Использование линейных регрессионных соотношений, полученных на основе модельных и экспериментальных данных, для определения водозапаса облаков из наземных микроволновых измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 5. С. 386–394. DOI: 10.15372/AOO20190508; *Бирюков Е.Ю., Косцов В.С.* The use of linear regression relations derived from model and experimental data for retrieval of the water content of clouds from ground-based microwave measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 569–577.
13. *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.
14. *Radiometer Physics*. A Rohde and Schwarz Company [Electronic resource]. URL: <https://www.radiometer-physics.de> (last access: 3.03.2020).
15. *The University of Manchester*. Centre for Atmospheric Science. Clouds [Electronic resource]. URL: <http://www.cas.manchester.ac.uk/resactivities/cloudphysics/background/classification/> (last access: 3.03.2020).
16. *Rosenkranz P.W.* Line-by-line microwave radiative transfer (non-scattering) // *Remote Sens.* 2017. DOI: 10.21982/M81013.
17. *Maetzler C.* Ground-based observations of atmospheric radiation at 5, 10, 21, 35, and 94 GHz // *Radio Sci.* 1992. V. 27. P. 403–415.
18. *ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=746> (last access: 3.03.2020).

***E.Yu. Biryukov, V.S. Kostsov. Application of a regression algorithm to the problem of studying horizontal inhomogeneity of the cloud liquid water path on the basis of the ground-based microwave observations in the angular scanning mode.***

The results of the cloud liquid water path (LWP) “land–sea” gradient retrieval from ground-based measurements of downwelling microwave radiation near the coastline of the Gulf of Finland in Saint-Petersburg region are presented. The measurements were carried out with the RPG-HATPRO radiometer operating at the Faculty of Physics of Saint-Petersburg State University in the angular scanning mode. The inverse problem was solved by the linear regression method. Different statistical models of cloud cover were used for training the algorithm. The LWP gradient mean values were derived over the winter and summer periods of seven years of observations. The results have shown positive “land–sea” LWP gradient (higher values over land and lower over sea) during both summer and winter seasons. This fact is qualitatively consistent with available satellite data.