

*Е. В. Заболотских*

### СПУТНИКОВЫЕ ПАССИВНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ОКЕАН – АТМОСФЕРА» ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

*E. V. Zabolotskih*

### SATELLITE PASSIVE MICROWAVE REMOTE SENSING METHODS TO STUDY OCEAN–ATMOSPHERE SYSTEM UNDER EXTREME WEATHER CONDITIONS

В работе представлены методы восстановления влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и скорости приводного ветра по данным спутникового микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer 2, разработанные на основании физического моделирования измерений и применимые для условий экстремальных погодных явлений, характеризующихся развитием штормовых и ураганных ветров — тропических, внетропических и полярных циклонов.

**Ключевые слова:** *влагозапас атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра, спутниковая пассивная микроволновая радиометрия, AMSR2, моделирование радиояркостной температуры, нейронные сети, алгоритмы восстановления параметров, экстремальные ветра.*

The methods for total atmospheric water vapor content, total cloud liquid water content and sea surface wind speed retrieval from the satellite passive microwave radiometer Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 are presented. The methods are developed with physical modeling. They are applicable under extreme weather conditions featured by storm and hurricane winds — for tropical, extra-tropical cyclones and polar lows.

**Keywords:** *total atmospheric water vapor content, total cloud liquid water content, sea surface wind speed, satellite passive microwave radiometry, AMSR2, brightness temperature modeling, Neural Networks, retrieval algorithms, extreme winds.*

#### **Введение**

С развитием спутниковых систем, позволяющих получать и накапливать глобальные данные измерений, одной из центральных проблем дистанционного зондирования стала интерпретация спутниковых данных, перевод измерений в геофизические параметры. Физической основой спутникового пассивного микроволнового зондирования является измерение микроволновыми радиометрами собственного излучения объектов в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра. Данные измерения используются как для наблюдения за поверхностью Земли, так и для зондирования атмосферы. Спутниковые микроволновые радиометрические измерения характеризуются возможностью получения регулярной оперативной информации об атмосфере и подстилающей поверхности в глобальном масштабе и, дополняя комплекс

традиционных гидрометеорологических наблюдений, вносят существенный вклад в улучшение анализа погодообразующих процессов и климата [1]. Особое значение приобретают эти измерения над обширными районами океанов, где традиционные измерения либо недостаточны, либо вообще отсутствуют.

Интенсивность собственного излучения и другие его характеристики зависят как от термодинамической температуры излучающих сред, так и от их строения, состава и других физических параметров. Это обстоятельство позволяет развивать методы спутниковой микроволновой радиометрии для оценки геофизических параметров. Для диапазона, в котором измеряется радиотепловое излучение системы атмосфера – подстилающая поверхность (1–100 ГГц), характерен целый ряд преимуществ по сравнению с другими спектральными областями электромагнитного спектра [2].

Прозрачность атмосферы в длинноволновой части микроволнового спектра ( $\lambda > 1,5$  см) позволяет независимо от погодных условий получать информацию о таком важнейшем параметре океана, как скорость приводного ветра. Сведения о приводном ветре имеют первостепенное значение при изучении взаимодействия океана и атмосферы, циркуляции океанических вод и их влияния на погоду и климат Земли. Данные о скоростях и направлении ветра необходимы для уточнения прогнозов погоды, выявления зарождающихся ураганов, циклонов различного масштаба, прослеживания путей их следования, расчета интенсивности штормов на море. Оперативные измерения приводного ветра высокого пространственного и временного разрешения необходимы для обеспечения транспортных и промысловых операций, строительства и эксплуатации нефтяных платформ и уменьшения рисков, связанных с экстремальными явлениями погоды, при которых развиваются штормовые и ураганные ветры (полярные и внетропические циклоны, тропические ураганы и тайфуны, штормовые нагоны).

Наличие в микроволновой спектральной области резонансных линий поглощения водяного пара позволяет определять влагозапас атмосферы [7]. Кроме того, в данном диапазоне существенно поглощает излучение жидкокапельная фракция воды в атмосфере, что делает возможным восстановление водозапаса облаков и интенсивности жидких осадков. Процессы перехода водяного пара в жидкое и твердое состояние и обратно, постоянно происходящие в природе, имеют огромное значение для формирования погоды и климата Земли [6]. Количественная информация о влагозапасе атмосферы и водозапасе облаков необходима для прогноза осадков и входит, наряду с интенсивностью осадков, в качестве важнейших параметров в климатические модели [3]. Карты влагозапаса с высоким временным разрешением позволяют судить о положении атмосферных фронтов и движении воздушных масс. Наконец, водяной пар является одним из важнейших парниковых газов в атмосфере Земли, поэтому точная количественная оценка его пространственно-временной изменчивости представляет исключительную важность при изучении изменений климата и климатологических циклов [6].

Особую ценность данные радиометров представляют в экстремальных условиях погоды. Экстремальные погодные явления (тропические, внетропические и полярные циклоны) сопровождаются штормовыми ветрами, высокими волнами, ливневыми осадками. В таких условиях большинство измерений других приборов либо целиком теряют информативность, либо интерпретация измерений сопровождается существенными ошибками. При этом данные измерений спутниковых микроволновых радиометров

не теряют информативности. Их громадным преимуществом является многоканальность, позволяющая моделировать и разделять вклады в сигнал разных параметров атмосферы и океана. Успех в подобном моделировании зависит от адекватности используемых моделей излучения океана, а также излучения и поглощения атмосферы.

Существующие готовые спутниковые продукты по влагозапасу атмосферы, водозапасу облаков и скорости приводного ветра именно в экстремальных погодных явлениях закрыты обширными масками, т.е. не предоставляют количественной информации о параметрах океана и атмосферы [4]. Маскирование осуществляется на основе применения необоснованно используемых фильтров диагностики осадков, что приводит к отсутствию информации о параметрах атмосферы и океана там, где нет физически обоснованных причин ее не восстановить по данным радиометрических измерений и именно там, где такая информация имеет первостепенное значение для снижения рисков, связанных с развитием штормовых и ураганных ветров.

Расширение возможностей использования спутниковых данных для оценки параметров атмосферы и подстилающей поверхности напрямую связано с развитием методов обработки информации, разработкой эффективных алгоритмов, обеспечивающих точности восстановления геофизических параметров, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к допустимым уровням погрешностей определения параметров. Так, для задач оперативной океанологии и метеорологии точности определения скорости приводного ветра должны быть не хуже 2 м/с, водозапаса облаков — 20 %, влагозапаса атмосферы 5–15 %. Обзор существующих методов оценки геофизических параметров позволяет сделать вывод, что требуемые точности оценок в настоящее время удовлетворяются лишь при благоприятных погодных условиях — отсутствии осадков и облачности с водозапасом, большим 0,5 кг/м<sup>2</sup>, и при скорости ветра, не превышающей 15 м/с. С ухудшением погодных условий ошибки определения параметров при помощи традиционных методов возрастают в несколько раз. При водозапасе облаков, большем 0,5 кг/м<sup>2</sup>, точности оценок перестают удовлетворять предъявляемым требованиям [11, 12].

В связи с этим, несмотря на большое количество существующих методов, остается актуальной проблема создания «всепогодных» алгоритмов оценок параметров, эффективных при расширенном диапазоне погодных условий, включающем облачность с водозапасом, превышающим 0,5 кг/м<sup>2</sup>, и сильные ветры со скоростью больше 15 м/с. Именно такие алгоритмы позволяют проводить исследования экстремальных погодных явлений, связанных с развитием штормовых ветров, облачностью большого водозапаса и осадками, такими как полярные, внетропические и тропические циклоны. Наличие у радиометров серии Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) каналов измерений в С- и X-диапазонах — достаточно чувствительных к приводному ветру даже в условиях осадков — открывает принципиальную возможность восстановления ветра в таких условиях, в которых картирование полей ветра невозможно с использованием других спутниковых измерений. Тем не менее до сих пор не появилось работ, свидетельствующих об успешной реализации данной возможности [9].

Настоящая работа посвящена разработке новых методов количественной оценки параметров системы «океан–атмосфера» по данным измерений спутникового микроволнового радиометра последнего поколения AMSR2, эффективных в расширенном диапазоне погодных условий, включающем такие экстремальные явления, как

полярные, внетропические и тропические циклоны, характеризующиеся штормовыми ветрами, превышающими 15 м/с.

### Методология

Новые методы количественной оценки параметров системы «океан — атмосфера» основаны на использовании результатов физического моделирования излучения данной системы, в том числе для условий, сопровождающихся сильными ( $> 15$  м/с) ветрами. Моделирование радиояркостной температуры ( $T_{я}$ ) микроволнового излучения для частот, превышающих X-диапазон, проводится без учета рассеяния, то есть для условий, характеризующихся отсутствием осадков, в то время как  $T_{я}$  микроволнового излучения на частотах C- и X-диапазона рассчитывается с учетом ослабления излучения слоем осадков. Проведение численного эксперимента по замкнутой схеме, при котором последовательно решаются прямая и обратная задачи атмосферной оптики для микроволнового диапазона, позволяет создать методы восстановления геофизических параметров с использованием результатов модельных расчетов [5].

Перенос микроволнового излучения в системе «океан — атмосфера» сопровождается излучением, поглощением и рассеянием атмосферными газами, облаками, осадками и поверхностью океана. В отсутствии осадков длина волны излучения  $\lambda \gg r$  — характерного размера частиц, взаимодействующих с излучением (более корректно:  $\rho \equiv 2\pi r/\lambda \ll 1$ ). Для рассматриваемых частот (от 6,9 до 89 ГГц) такое предположение справедливо для атмосферных газов всегда, а для облаков — практически всегда, поскольку радиусы облачных капель редко превосходят 50... 80 мкм. При таком предположении атмосфера не рассеивает, а только излучает и поглощает микроволновую радиацию [1].

Общая дифференциальная форма уравнения переноса радиояркостной температуры микроволнового излучения  $T_{я}$  вдоль направления  $s$  под азимутальным ( $\varphi$ ) и зенитным ( $\theta$ ) углами в атмосфере без рассеяния с коэффициентом поглощения  $\alpha_n$  имеет следующий вид [2]:

$$dT_{я}(\varphi, \theta) = \alpha_n [T - T_{я}(\varphi, \theta)] ds. \quad (1)$$

В большинстве случаев (исключая большие углы визирования, когда необходимо учитывать явления рефракции) при решении уравнения переноса (1) достаточно рассматривать атмосферу как плоскостойкую среду, заменяя пространственную координату  $s$  вдоль направления излучения на вертикальную  $h$ :  $ds = dh/\mu$ , где  $\mu = \cos \theta$ . Упрощенная форма одномерного уравнения переноса излучения в приближении «чистого поглощения»:

$$\mu \cdot \frac{dT_{я}(h)}{dh} = -\alpha_n(h)T_{я}(h) + \alpha_n(h)T(h), \quad (2)$$

где  $\mu = \cos \theta$ ;  $\theta$  — зенитный угол;  $h$  — вертикальная координата;  $T(h)$  — температура атмосферы;  $\alpha_n$  — коэффициент поглощения.

В таком одномерном приближении, учитывая граничные условия на верхней границе атмосферы и на поверхности океана, суммарное восходящее излучение системы

будет включать в себя 4 составляющие: восходящее излучение атмосферы  $T_{яа}^{\uparrow}$ , нисходящее излучение атмосферы, отраженное поверхностью океана и ослабленное слоем атмосферы  $T_{яа\_отр}^{\downarrow}$ , излучение океана, ослабленное в атмосфере  $T_{яок}$  и космическое излучение  $T_{к}$ , равное  $2,7 \text{ К} \cdot \exp(-2\tau)(1-\chi)$ :

$$T_{я} = T_{яа}^{\uparrow} + T_{яа\_отр}^{\downarrow} + T_{к} + T_{яок}, \quad (3)$$

$$T_{яа}^{\uparrow} = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} T(h) \alpha_{п}(h) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_h^{\infty} \alpha_{п}(h') dh'\right) dh, \quad (4)$$

$$T_{яа\_отр}^{\downarrow} = (1-\chi) \cdot \exp(-\tau) \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} T(h) \alpha_{п}(h) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_0^h \alpha_{п}(h') dh'\right) dh, \quad (5)$$

$$\tau = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} \alpha_{п}(h') dh', \quad (6)$$

$$T_{яок} = \chi \cdot T_{ок} \cdot \exp(-\tau), \quad (7)$$

где  $\tau$  — оптическая толщина атмосферы;  $\chi$  — коэффициент излучения океана;  $T_{ок}$  — температура поверхности океана (ТПО). Таким образом, для расчета радиояростной температуры  $T_{я}$  уходящего микроволнового излучения в системе «атмосфера — океан» в рамках сделанных приближений (отсутствие осадков и рефракции) требуется информация о следующих параметрах радиационно-метеорологической модели — о поглощении микроволнового излучения в атмосферных газах и облаках —  $\alpha_{п}(h)$ , и об излучении радиации поверхностью океана —  $\chi$ .

На рис. 1 показаны основные составляющие микроволнового излучения системы «океан — атмосфера» и параметры, от которых оно зависит.

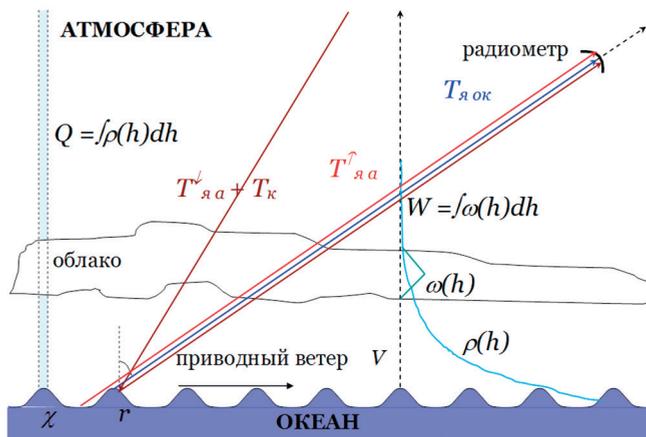


Рис. 1. Схема формирования микроволнового излучения в системе «океан — атмосфера»

Корректный учет атмосферного вклада в излучение и поглощение, определение оптических толщин требуют знания  $\alpha_\nu(h)$ . В исследуемом диапазоне электромагнитного спектра заметно поглощают лишь газы, молекулы которых имеют дипольные моменты — это кислород и водяной пар — и жидкая фаза воды. Кристаллическая водяная фракция практически прозрачна для излучения в этом диапазоне спектра и ее собственное излучение мало. В данной работе при расчете поглощения микроволнового излучения кислородом и водяным паром использовалась аппроксимационная методика [8].

Микроволновое излучение морской поверхности, не подверженной воздействию приводного ветра, определяется только температурой и диэлектрической постоянной морской воды. При наличии ветра коэффициент излучения становится функцией скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы. Физическое моделирование коэффициента излучения океана  $\chi$ , особенно для экстремальных ветров, представляет собой сложнейшую задачу. В качестве альтернативы выступает эмпирическая параметризация ветровой зависимости  $\chi$ . Применение данного подхода требует аккуратных измерений отклика в изменении радиояркостных температур на ветровой сигнал и выведение экспериментальной зависимости коэффициента излучения от скорости ветра при различных углах излучения, температурах поверхности и значениях солёности морской воды. Большинство эмпирических моделей излучения океана используют измерения микроволновых яркостей вблизи поверхности океана для исключения влияния атмосферы.

Отличительной особенностью модели, использованной в данной работе, является рост  $\partial\chi/\partial V$ , начиная с определенных скоростей ветра, при которых появляются пенные образования. Данная эмпирическая модель основана также на интегрировании экспериментальных результатов измерений скорости ветра и одновременных измерений микроволнового излучения. Результатом объединения данных различных экспериментов явилось создание базы данных консолидированных измерений, на основании которой и была выведена формула, согласно которой:

$$\chi = \alpha \cdot (1 - f) + \beta \cdot f, \quad (8)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, интегрально ответственный за добавку к коэффициенту излучения, появляющуюся в результате ветрового волнения с учетом как крупно- так и мелкомасштабных волн;  $\beta$  — коэффициент, интегрально ответственный за добавку к коэффициенту излучения, вызванную всеми типами пенных образований;  $f$  — доля поверхности океана, покрытая этими образованиями. Если доля пены является функцией скорости ветра, то коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  являются функциями не только скорости ветра, но также частоты, температуры поверхности, солёности морской воды, угла визирования и поляризации. Комплексная параметризация коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  получена в результате обобщения экспериментальных данных.

Для расчета  $T_y$  микроволнового излучения использовалась база данных аэрологических и судовых измерений глобального и всесезонного масштаба с научно-исследовательских судов погоды. Эти измерения состоят из измерений радиозондов атмосферных профилей метеопараметров, измерений скоростей приводного ветра и температуры поверхности океана и судовых синоптических наблюдений облачности.

Всего около 3000 наборов состояний «океан–атмосфера». Наблюдения за облаками позволили, на основании сопоставления с профилями относительной влажности воздуха, оценить высоты верхней и нижней границ облачности и, с использованием статистических данных о водности различных типов облачности, построить модельные профили водности в облаках. С использованием измеренных профилей влажности атмосферы и модельных значений водности облаков были проведены расчеты влагозапаса атмосферы  $Q_0$  и водозапаса облаков  $W_0$ .

Для решения обратной задачи использовались нейронные сети (НС) типа многослойный перцептрон (МП). Выполнение модельной калибровки спутниковых измерений AMSR2 дало возможность определить калибровочные поправки, ответственные суммарно за неточности геофизической модели и погрешности внутренней радиометрической калибровки приборов. Данные калибровочные поправки позволяют применять алгоритмы, настроенные на результатах модельных расчетов, к данным реальных спутниковых измерений. При этом тестирование методов проводилось с учетом данных независимых измерений геофизических параметров. Использование специальных подходов, современных моделей взаимодействия микроволнового излучения со средой и корректирующих поправок к  $T_y$  позволило добиться высокой точности методов восстановления в условиях экстремальных погодных явлений, включающих штормовые (более 15 м/с) ветра, сплошную облачность и осадки, подтвержденной сравнением с данными контактных измерений. Для более корректного маскирования областей с осадками применительно к использованию методов восстановления влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков использовался метод, основанный на применении порогового значения для интегрального поглощения атмосферы на частоте 10,65 ГГц [12].

### **Конфигурации нейронных сетей для восстановления параметров океана и атмосферы**

В самом общем случае задача обращения измеренного сигнала в параметры атмосферы и океана относится к так называемым обратным задачам атмосферной оптики. Решение обратных задач атмосферной оптики сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода, которое относится к классу некорректных в классическом смысле задач математической физики.

Для решения обратных некорректных задач часто используются и искусственные нейронные сети (НС), которые с успехом применяются в различных областях обработки сигналов. Нейронные сети обладают способностью к обобщению входной информации, что позволяет выделять в исследуемых сигналах основные закономерности и удалять случайный шум, неизбежно присутствующий в результатах эксперимента. Следовательно, при решении обратных некорректных задач с помощью НС некоторая часть шумовой составляющей сигнала будет удалена автоматически. Однако во многих сигналах, полученных в результате эксперимента, уровень случайных помех слишком высок для корректной нейросетевой обработки. При решении ряда некорректных обратных задач уровень шума возрастает настолько, что обучение сети может зайти в тупик и никогда не закончится, или же сеть научится воспроизводить закономерности, не имеющие отношения к физически обусловленным.

В общем виде задача спутникового дистанционного зондирования может быть сформулирована как восстановление геофизических параметров

$$P_i \{i=1, \dots, N,$$

где  $N$  — число параметров} по данным измерений (в данном случае это измерения AMSR2)  $S_j \{j=1, \dots, M;$  где  $M$  — число измерений прибора). Математически обратная задача может быть записана в виде:

$$\bar{P} = f(\bar{S}). \quad (9)$$

Задачи дистанционного зондирования такого класса сводятся к определению функции  $f$ . Эту задачу решают НС типа многослойного персептрона (МП). Многослойный персептрон представляет собой универсальный аппроксиматор, позволяющий сколь угодно точно аппроксимировать зависимость выходных сигналов от входных параметров. Суть НС подхода в задачах наилучшей аппроксимации заключается в построении нелинейной функции  $f$ , связывающей входные параметры задачи  $S_j$  с выходными параметрами  $P_i$  на основании имеющихся эмпирических связей. Связь входных и искомых параметров осуществляется через один или более скрытых уровней. Каждый такой уровень состоит из определенного количества обрабатывающих узлов — нейронов.

Выбор входных параметров НС (обозначим каналы AMSR2 радиометра T06H, T06V, T10H, T10V, T18H, T18V, T23H, T23V, T36H, T36V для измерений на частотах 6,9; 10,65; 18,7; 23,4; 36,5 и 89 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризаций соответственно) определялся анализом чувствительности  $T_{я}$  к  $Q$ ,  $W$  и  $V$ , основанным на результатах модельных расчетов.

При восстановлении  $Q$  и  $W$  и высокочастотные каналы T89H, T89V были сразу исключены из метода вследствие их низкой чувствительности в областях высоких значений  $Q$  и  $W$  (из-за насыщения), так же как и каналы на частотах 6,9 и 10,65 ГГц как обладающие низкой чувствительностью во всем диапазоне изменчивости  $Q$  и  $W$ . Первоначально использовались все оставшиеся каналы, хотя впоследствии было оставлено 4 наиболее информативных канала: T18H, T23H, T23V, T36H — для восстановления влагозапаса атмосферы и T18H, T23V, T36H, T36V — для восстановления водозапаса облаков без потери результирующей точности восстановления параметров. Результирующая среднеквадратичная ошибка оценки, полученная на тестирующем наборе данных, рассматривалась в качестве основной характеристики алгоритмов. Тестировались НС с различным количеством нейронов. Результаты тестирования показали, что наименьшее значение  $s$  достигается при использовании НС с одним скрытым уровнем, состоящим из 5 нейронов для обоих параметров. Схемы оптимальных НС для восстановления  $Q$  и  $W$  по данным AMSR2 представлены на рис. 2.

При применении настроенных НС к модельным значениям  $T_{я}$  ошибка восстановления  $Q$  составила 1,0 кг/м<sup>2</sup>, а ошибка восстановления  $W$  составила 0,05 кг/м<sup>2</sup> для настроенного и тестирующего набора данных.

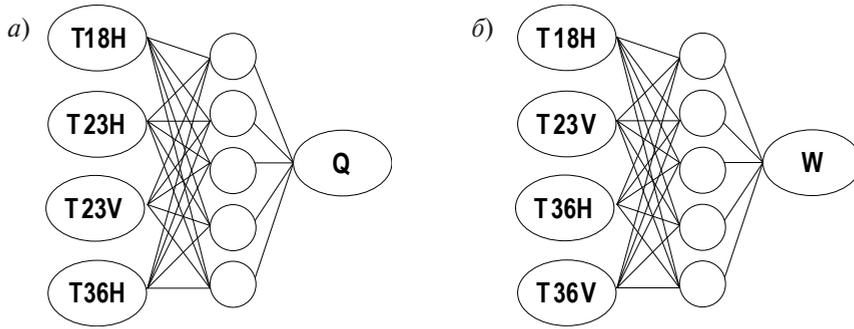


Рис. 2. Оптимальные конфигурации нейронных сетей, используемые в алгоритмах восстановления влагзапаса атмосферы и влагзапаса облаков по данным измерений AMSR2

Диаграмма разброса восстановленных по модельным  $T_x$  значений  $Q'$  от измеренных  $Q_0$  для тестирующего набора данных показана на рис. 3, а, а диаграмма разброса влагзапаса облаков  $W'$ , восстановленного по данным AMSR2, от рассчитанных по модельным значениям водности облаков  $W_0$ , представлена на рис. 3, б.

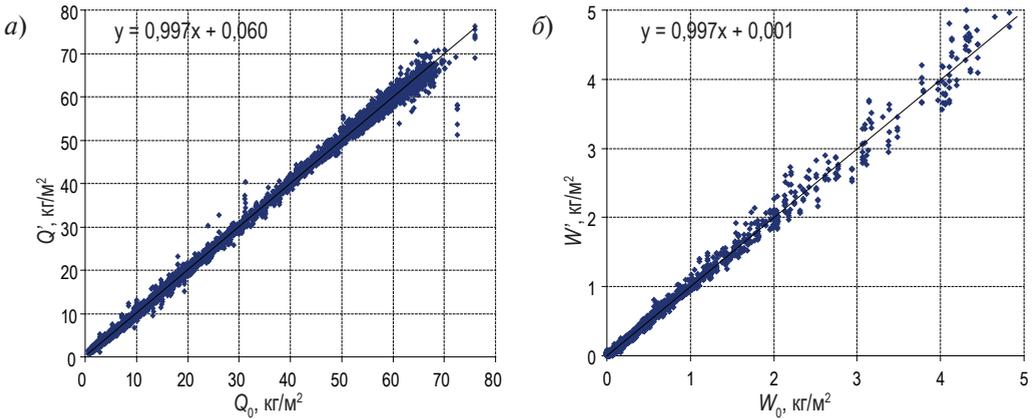


Рис. 3. Диаграмма разброса влагзапаса атмосферы  $Q'$ , восстановленного с помощью нейронно-сетевого алгоритма по данным измерений AMSR2, от рассчитанного по измерениям влажности атмосферы  $Q_0$  (а); диаграмма разброса влагзапаса облаков  $W'$ , восстановленного по данным AMSR2, от рассчитанных по модельным значениям водности облаков значений  $W_0$  (б)

При создании метода восстановления скорости приводного ветра  $V$  по данным измерений AMSR2 вначале был разработан алгоритм оценки  $V$  для условий без осадков на основании результатов численного эксперимента. Для условий без рассеяния для восстановления скорости приводного ветра было настроено две НС:

одна — с использованием каналов на частотах 6,9 и 10,65 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации, вторая — с использованием каналов на частотах 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц, только горизонтальной поляризации. Теоретические погрешности методов —  $\sigma_V^1 = 0,9$  м/с для низкочастотного (НЧ),  $\sigma_V^2 = 1,8$  м/с для высокочастотного (ВЧ) алгоритма. ВЧ алгоритм применим только для условий нерассеивающей атмосферы без осадков. Конфигурации НС для НЧ и ВЧ алгоритмов восстановления скорости приводного ветра по данным измерений AMSR2 представлены на рис. 4.

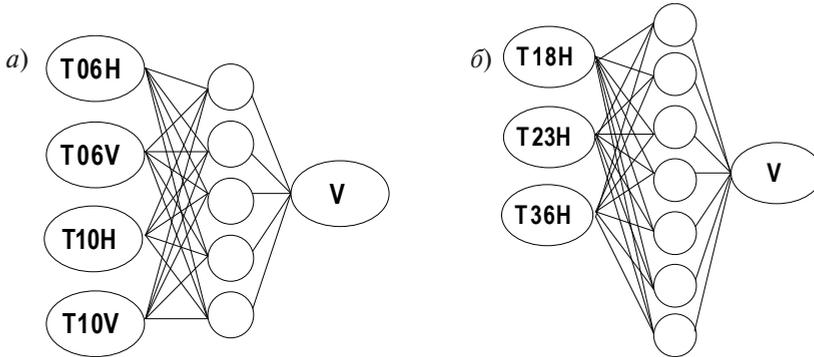


Рис. 4. Конфигурации нейронных сетей, используемые в алгоритмах восстановления скорости приводного ветра  $V$  по данным измерений AMSR-E, AMSR2:  
*a* — при оптически плотной атмосфере ( $\tau_{10} > 0,08$ ) — НЧ-алгоритм;  
*б* — при оптически прозрачной атмосфере ( $\tau_{10} < 0,08$ ) — ВЧ-алгоритм

Поскольку все вышеприведенные методы, кроме НЧ-алгоритма восстановления  $V$ , разработаны для условий атмосферы без рассеяния, перед применением методов необходимо отфильтровывать данные с осадками в системе «океан–атмосфера». Метод фильтрации оптически плотных атмосфер основан на использовании пороговых значений интегрального атмосферного поглощения на частоте 10,65 ГГц  $\tau_{10}$ . Интегральное атмосферное поглощение на данной частоте восстанавливается по данным измерений AMSR2 на каналах измерений на частотах 10,65; 18,7 и 23,8 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации. Оптимальная нейронная сеть состоит из одного скрытого уровня из 5 обрабатывающих нейронов. Теоретическая погрешность восстановления атмосферного поглощения равна 0,0013 (относительная погрешность 3 %).

При значениях водозапаса облаков, ведущих к превышению порога  $\tau_{10} = 0,08$ , высока вероятность образования осадков, поэтому метод можно считать методом фильтрации осадков.

#### **Валидация методов с использованием данных независимых контактных измерений**

Валидация метода восстановления влагозапаса атмосферы проводилась с использованием независимых измерений влажности радиозондами островных станций.

Данные радиозондирования были получены с сайта университета Вайоминг (<http://weather.uwyo.edu/upperair/>). Использовались данные трех островных станций в полярном регионе — Jan Mayen (70,9° с.ш., 8,7° з.д.), Vjornoya (74,5° с.ш., 19,0° в.д.), Torshavn (62° с.ш., 6,8° з.д.) — и одной островной станции в тропических широтах Pago Pago (14,33° ю.ш., 170,71° з.д.). Условием выбора станций радиозондирования являлись: а) небольшие размеры острова — для уменьшения влияния суши на работу алгоритма и б) высота над уровнем моря, не превышающая 10–20 м над уровнем моря.

Отличительной особенностью измерений радиозондов на этих станциях является высокое вертикальное разрешение: один радиозонд измеряет параметры атмосферы на более чем 90 уровнях, что повышает точность расчета влагозапаса по данным радиозондирования. Пространственное совмещение в пределах 50 км проводилось таким образом, чтобы диаграмма лепестков антенны не захватывала участки суши. Для расчета влагозапаса атмосферы по данным измерений радиозондов  $Q_{p/3}$  измеренная относительная влажность была пересчитана в абсолютную и интерполирована между уровнями методом кубических сплайнов. Расчеты влагозапаса атмосферы отличаются на 2–5 % при одном и том же профиле относительной влажности в зависимости от формулы пересчета относительной влажности в абсолютную и от метода интерполяции значений влажности между уровнями. Этот разброс в расчетах растет с уменьшением вертикального разрешения. Были использованы измерения, проводившиеся в течение двух лет — с 1 января 2013 г. по 31 декабря 2014 г.

Диаграмма разброса  $Q_{AMSR2}$  от  $Q_{p/3}$  для станции Pago Pago в тропических широтах и станций Jan Mayen, Vjornoya и Torshavn в полярных широтах представлена на рис. 5.

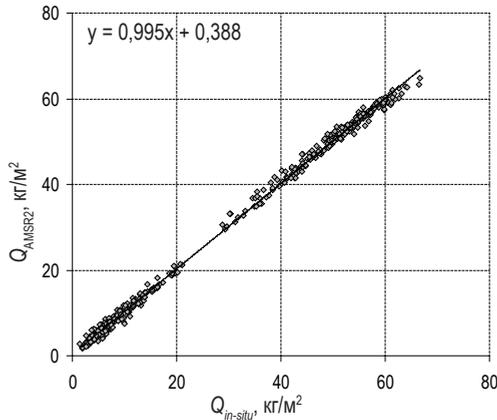


Рис. 5. Диаграмма разброса восстановленных по данным AMSR2 значений интегральной влажности атмосферы  $Q_{AMSR2}$  от рассчитанных по измерениям радиозондов значений  $Q_{p/3}$

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что в тропических районах, характеризующихся высокими значениями  $Q$  (среднее значение  $Q$  для станции Pago Pago составило 50,1 кг/м<sup>2</sup>), метод обладает погрешностью ~1,14 кг/м<sup>2</sup> (2,3 %), а в полярных

районах, характеризующихся низкими значениями  $Q$  (среднее значение  $Q \sim 10,3 \text{ кг/м}^2$ ), погрешность составляет  $\sim 0,68 \text{ кг/м}^2$  (6,6%). Погрешность, рассчитанная с использованием всех данных  $\sigma = 1,0 \text{ кг/м}^2$ , что хорошо согласуется с результатами тестирования с использованием данных численного эксперимента.

Поскольку методы разработаны для исследования экстремальных явлений, отдельная валидация метода восстановления влагозапаса была проведена для условий экстремальных ветров в тропических циклонах. Для этого были использованы измерения влагозапаса GPS для специально отобранных случаев прохождения тропических циклонов (ТЦ) над несколькими станциями GPS (CNMR, SA42, SA40, ASPA) в тропических районах, при которых скорости ветра превышали  $15 \text{ м/с}$ . Всего было использовано около 150 таких отобранных случаев за период 2012–2015 гг. Погрешность метода при  $V > 15 \text{ м/с}$  составила  $1,7 \text{ кг/м}^2$ , в то время как погрешность готового спутникового продукта Remote Sensing Systems (RSS), основанного на использовании тех же измерений AMSR2, и рассчитанная с использованием тех же данных, оказалась равной  $3,5 \text{ кг/м}^2$ , то есть в два раза выше.

Иллюстрация применения алгоритма восстановления влагозапаса атмосферы в условиях, характеризующихся скоростями ветра  $V > 15 \text{ м/с}$ , приведена на рис. 6, на котором показаны поле скорости приводного ветра и поле влагозапаса атмосферы, восстановленные по данным AMSR2, в условиях тайфуна Nangka 9 июля 2016 г. Согласно данным Best Track, скорость ветра в районе станции GPS станции CNMR в 3:30 Гр. достигала  $33 \text{ м/с}$ . Ветер, по данным AMSR2, составил  $32 \text{ м/с}$ . Влагозапас атмосферы, по данным GPS в 3:15 Гр. равен  $64,8 \text{ кг/м}^2$ , что находится в хорошем соответствии с  $Q_{\text{AMSR2}} = 62,8 \text{ кг/м}^2$ . Области с высоким атмосферным поглощением, в которых восстановление влагозапаса не представляется возможным (осадки), замаскированы (пиксели белого цвета).

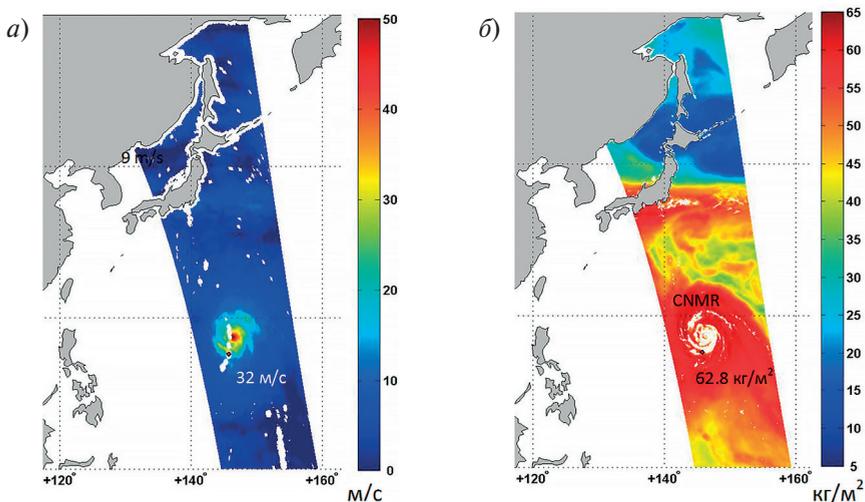


Рис. 6. (а) поле скорости приводного ветра, (б) поле влагозапаса атмосферы, восстановленные по данным AMSR2 в условиях тайфуна Nangka 9 июля 2016 г.  $\sim 3:30$  Гр

Оценка точности определения водозапаса облаков  $W$  с использованием независимых измерений водозапаса затруднительна. Чаще всего валидация алгоритмов определения водозапаса облаков осуществляется при использовании результатов численного эксперимента. При этом можно говорить лишь о точности оператора решения обратной задачи. Иногда валидацию проводят с использованием значений водозапаса облаков, восстановленных по данным наземных микроволновых радиометров. Последние сами по себе обладают большими погрешностями. Косвенное тестирование алгоритма определения водозапаса облаков проводится путем сравнения полей водозапаса с изображениями видимого и инфракрасного диапазонов. Для тестирования метода оценки водозапаса облачности в данной работе была использована косвенная валидация, основанная на качественном сопоставлении полей водозапаса облаков с инфракрасными и видимыми изображениями спектрорадиометра Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR).

На основании ~350 построенных полей водозапаса облаков и квазисинхронных (в пределах полутора часов) изображений AVHRR ИК диапазона был сделан вывод об адекватной диагностике наличия облачности, то есть при отсутствии облаков на снимках AVHRR наблюдались нулевые ( $\pm 0,05$  кг/м<sup>2</sup>) значения водозапаса, восстановленного по данным AMSR2. Пример такого сопоставления, с временной разницей 20 мин, иллюстрирующий адекватную работу алгоритма, приведен на рис. 7.

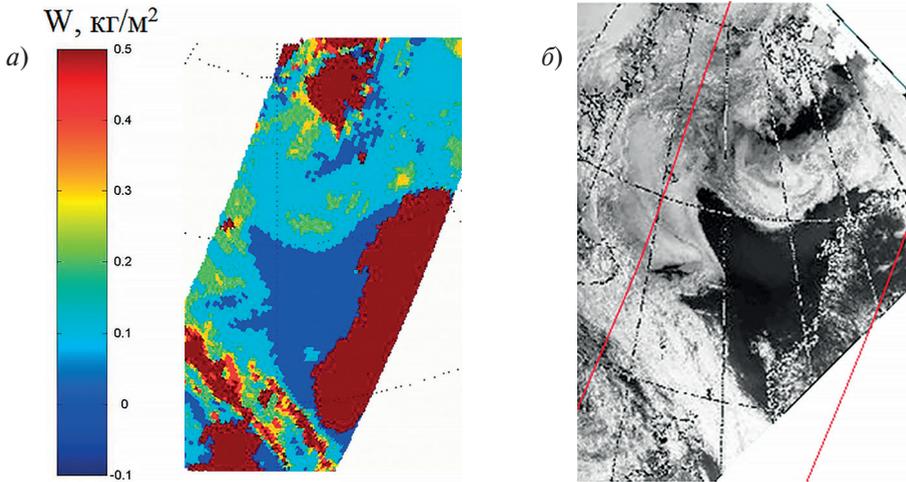


Рис. 7. (а) поле водозапаса облаков  $W_{AMSR2}$ , восстановленного по данным AMSR2 1 июля 2015 г. ~12:50 Гр.; (б) инфракрасное изображение спектрорадиометра AVHRR 1 июля 2015 г. ~12:30 Гр

Валидация алгоритма восстановления скорости ветра для условий умеренных ветров проводилась для радиометра AMSR-E на основе данных морских буев. Была использована база данных сопутствующих измерений AMSR-E и измерений буев, предоставленных JAXA (около 55 000 сопутствующих измерений). Тестирование показало, что НЧ-алгоритм обладает в 2 раза более высокой точностью оценок скорости

приводного ветра ( $\sigma_V^1 = 1,27$  м/с), чем ВЧ алгоритм ( $\sigma_V^2 = 2,5$  м/с). В северных широтах погрешность ВЧ-алгоритма ниже, чем в тропических, а для НЧ-алгоритма, наоборот, выше. Поэтому в условиях оптически прозрачных атмосфер северных широт с низкими значениями влаго- и водозапаса использование ВЧ-алгоритма предпочтительнее, учитывая его более высокое разрешение.

Для условий сильных ветров ( $V > 15$  м/с) валидация была проведена для радиометра AMSR2 и данных измерений ветра с нефтяных платформ. Измерения ветра на платформах, проводимые на высоте не ниже 50 м (приведенные к 10 м над уровнем моря), обладают высокой точностью в условиях сильных ветров. Измерения на таких высотах не искажаются воздушным потоком вокруг судов, как в случае проведения измерений с судна, и не затеняются высокими волнами, как при измерениях морских буев.

Измерения ветра с нефтяных платформ Норвежского и Северного морей были предоставлены Норвежским метеорологическим институтом. Над этими морями нередко случаи прохождения внетропических и полярных циклонов, поэтому среди данных достаточно скоростей ветра, превышающих 15 м/с. Около 64 000 всех данных содержат измерения  $V > 20$  м/с.

Все метеорологические станции на платформах расположены на высоте выше 50 м. Пространственно-временное совмещение позволило отобрать около 6500 сопутствующих измерений скорости ветра и радиометрических данных AMSR2 с разницей во времени измерений, не превышающей 30 мин на расстоянии от центра элемента разрешения до станции в пределах 25 км. Результаты сравнения скоростей ветра с платформ  $V_{in-situ}$  и результатов применения НЧ- и ВЧ-алгоритмов восстановления  $V_{AMSR2}$  представлены диаграммой разброса на рис. 8.

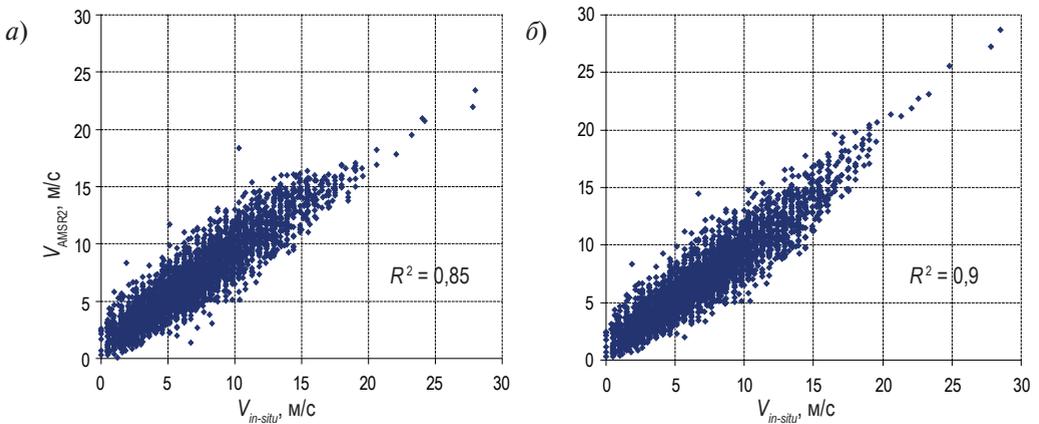


Рис. 8. Результаты тестирования алгоритмов восстановления скорости приводного ветра при помощи измерений ветра с нефтяных платформ: а — ВЧ-алгоритм; б — НЧ-алгоритм

Результирующая среднеквадратичная погрешность восстановления  $V_{ВЧ}$ -алгоритмом  $\sigma_{ВЧ} = 1,6$  м/с, НЧ-алгоритмом  $\sigma_{НЧ} = 1,4$  м/с.  $V_{AMSR2}$ , восстановленные при помощи

НЧ-алгоритма, лучше коррелируют с данными измерений нефтяных платформ (коэффициент корреляции 0,9), чем  $V_{\text{AMSR2}}$ , восстановленные при помощи ВЧ-алгоритма (коэффициент корреляции 0,85). Кроме того, из диаграммы разброса видно, что ВЧ-алгоритм существенно занижает данные наземных измерений в области сильных ветров. Средняя разница между восстановленными по данным AMSR2 и измеренными на платформах скоростями ветра для ветров с  $V > 15$  м/с составляет 1,9 м/с для ВЧ-алгоритма и всего 0,05 м/с для НЧ-алгоритма. Всего в данных было 238 измерений скоростей ветра с  $V > 15$  м/с и 18 с  $V > 20$  м/с, что не дает возможности сделать вывод о применимости методов в условиях ураганных ветров ( $> 33$  м/с).

Результаты применения алгоритмов восстановления  $V$  по данным AMSR2 были сравнены с альтернативными спутниковыми измерениями ветра с использованием скаттерометрических данных — со спутниковым продуктом по ветру на основании измерений MetOp-A ASCAT. Сравнение проводилось для региона, характеризующегося сильными ветрами, связанными с прохождением внетропических циклонов. Для тестирования данные ASCAT и AMSR2 были перепроецированы на единую регулярную сетку  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ . Были проанализированы два года, 2012 и 2013, измерений и отобраны 33 случая внетропических циклонов. GCOM-W1 AMSR2 и MetOp-A ASCAT проводят близкие по времени измерения только над двумя регионами Земли — над Северной Атлантикой в районе 11–14 Гр. (с разницей по времени 0–2 часа) и над северной частью Тихого океана ночью (с разницей по времени 2–4 часа). Учитывая быструю эволюцию полей ветра, второй регион был исключен из рассмотрения. Примеры квазисинхронных полей ветра по данным ASCAT и восстановленных при помощи разработанных алгоритмов по данным AMSR2 для случая внетропических циклонов в Северной Атлантике приведены на рис. 9.

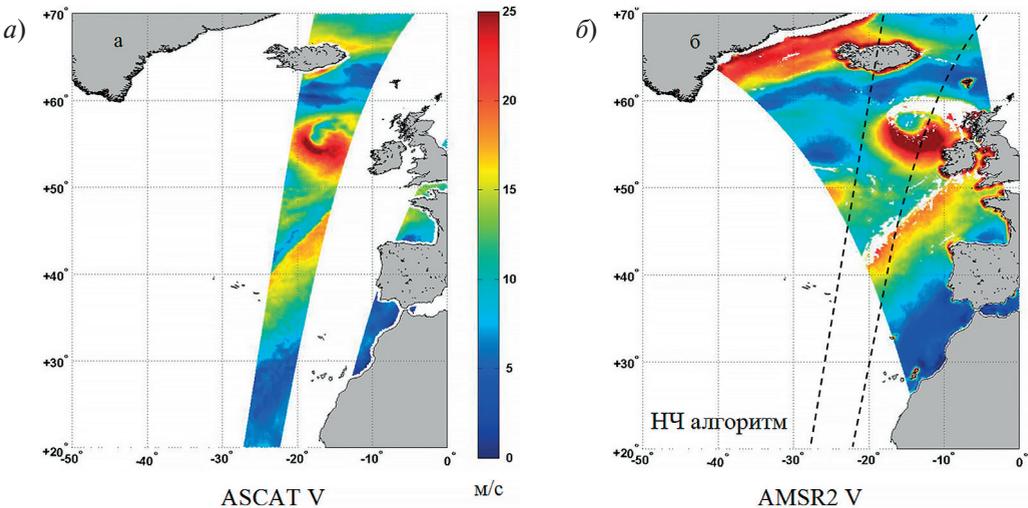


Рис. 9. Поля скорости приводного ветра для внетропического циклона в Северной Атлантике: *a* — по данным ASCAT; *б* — восстановленное при помощи НЧ-алгоритма по данным AMSR2. 29 января 2013 ~10:30–11:30 Гр

Завышение  $V_{НЧ}$ -алгоритмом в области ветров с  $V > 15$  м/с относительно данных ASCAT свидетельствует о недооценке сильных ветров скаттерометром [10] и косвенно подтверждает более корректную работу  $НЧ$ -алгоритма оценки ветра при экстремальных ветрах.

### Заключение

В данной работе представлены разработанные новые методы восстановления параметров атмосферы и океана по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2, эффективные в условиях экстремальных явлений (тропических, внетропических и полярных циклонов). Эффективность методов всесторонне верифицирована путем сравнения результатов применения методов к данным AMSR2 с данными независимых измерений параметров — как *in-situ*, так и альтернативных спутниковых продуктов. Физическое моделирование радиояркостной температуры  $T_{я}$  уходящего излучения системы «океан — атмосфера», основанное на использовании современных моделей взаимодействия излучения со средой, применимых в экстремальных условиях, позволило настроить нейронно-сетевые алгоритмы восстановления влагозапаса атмосферы  $Q$ , водозапаса облаков  $W$ , общего атмосферного поглощения  $\tau$  и скорости приводного ветра  $V$  и обосновать расширенный диапазон применения методов. Несмотря на то что методы основаны на результатах численного моделирования, применение калибровочных поправок к измерениям AMSR2 дало возможность применять методы к спутниковым измерениям.

Методы разработаны для условий без рассеяния, т.е. применимы над морскими поверхностями, свободными от морского льда при отсутствии осадков, но с облачностью любого водозапаса. Фильтрация осадков производится на основании использования пороговых значений восстановленного атмосферного поглощения на частоте 10,65 ГГц. Валидация метода с помощью расчета  $Q$  на основании измерений радиозондов влажности атмосферы позволила оценить погрешность восстановления  $\sigma_Q = 1$  кг/м<sup>2</sup>. Отдельная валидация для экстремальных условий в тропических циклонах, сопровождающихся ветрами с  $V > 15$  м/с, проведенная на основании измерений  $Q$  станциями GPS, привела к погрешности  $\sigma_Q = 1,7$  кг/м<sup>2</sup>, что в 2 раза ниже, чем погрешность альтернативного спутникового продукта по влагозапасу атмосферы из Remote Sensing Systems. Косвенная валидация метода восстановления водозапаса облаков была проведена на основании сопоставления полей водозапаса облаков с ИК и видимыми изображениями AVHRR.

Метод восстановления скорости приводного ветра  $V$  по данным измерений AMSR2 состоит из двух алгоритмов. Первый — высокочастотный (ВЧ) алгоритм оценки  $V$  — применим в условиях оптически прозрачных атмосфер без осадков, т.е. диапазон его применимости определяется применением метода фильтрации осадков, основанного на величине восстановленных значений  $\tau$ . Второй алгоритм — (НЧ) алгоритм оценки  $V$  — основан на использовании измерений низкочастотных каналов радиометра в С- и Х-диапазонах и применим во всех условиях, включая экстремальные условия тропических циклонов. Точность ВЧ-алгоритма ( $\sigma_{ВЧ} = 2,5$  м/с), оцененная на основании сопоставления с данными измерений морских буев для обычных, не экстремальных условий, в 2 раза ниже, чем точность НЧ-алгоритма ( $\sigma_{НЧ} = 1,27$  м/с).

Однако разрешение ВЧ-алгоритма в 4 раза выше, поэтому в условиях оптически прозрачных атмосфер северных широт с низкими значениями атмосферного поглощения использование ВЧ-алгоритма предпочтительнее.

По результатам сопоставления с данным измерений ветра с нефтяных платформ для условий сильных ветров ( $V > 15$  м/с) погрешность восстановления  $V$  ВЧ-алгоритмом  $\sigma_{ВЧ} = 1,6$  м/с, низкочастотным алгоритмом  $\sigma_{НЧ} = 1,4$  м/с. ВЧ-алгоритм существенно занижает ветер в области сильных ветров.

По результатам сравнения применения алгоритмов с ветром по данным Metop-A ASCAT для внетропических циклонов Северной Атлантики НЧ алгоритм завышает скаттерометрический ветер в диапазоне  $V > 15$  м/с, что косвенно подтверждает более корректную работу НЧ-алгоритма при экстремальных ветрах. Весь комплекс методов представляет собой инструмент для изучения экстремальных явлений, который может быть использован при решении самых разных задач, в том числе при моделировании эволюции экстремальных явлений, изучении климата, в оперативном прогнозировании и т.д.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания по проекту № 2498.

### Литература

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. — М.: Наука, 1974. — 188 с.
2. Кондратьев К.Я., Рабинович Ю.И., Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. Микроволновое дистанционное зондирование окружающей среды. Обзор ВНИИГМИ-МЦД. — Обнинск, 1975, — 110 с.
3. Гусакова М.А. Влияние облачности на кратковременные климатические изменения // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 29. — С. 95–99.
4. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Шапрон Б. и др. Валидация модели переноса излучения на частотах микроволновых радиометров SSMIS и AMSR-E и ее применение при анализе морских погодных систем с использованием усовершенствованных алгоритмов // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 29. — С. 146–160.
5. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Шапрон Б. и др. Улучшенные модели поглощения атмосферы и излучения океана в диапазоне 5–100 ГГц для расчета яркостных температур системы «океан — атмосфера» // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 29. — С. 169–182.
6. Малинин В.Н. Влагообмен в системе «океан—атмосфера». — СПб.: Гидрометеиздат, 1994. — 197 с.
7. Митник Л.М. Физические основы дистанционного зондирования окружающей среды. — Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1977. — 58 с.
8. Liebe H.J., Layton D.H. Millimeter-wave properties of the atmosphere: Laboratory studies and propagation modeling. Nat. Tech. Inf. Service. Boulder, CO, NTIA Rep. 87–24, 1987.
9. Meissner T., Wentz F.J. Wind-Vector Retrievals Under Rain With Passive Satellite Microwave Radiometers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. Vol. 47. № 9. — P. 3065–3083.
10. Quilfen Y., Prigent C., Chapron B., Mouche A.A., Houti N. The potential of QuikSCAT and WindSat observations for the estimation of sea surface wind vector under severe weather conditions // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. № C09023. — DOI:10.1029/2007JC004163.
11. Shibata A. A wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: Wind speed inside hurricanes // J. Oceanogr. 2006. Vol. 62. № 3. — P. 351–359.
12. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 40. № 13. — P. 3347–3350.