

УДК 551.571.6:[551.521+551.467]:001.891.57(211-17)

ВЛИЯНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ МОРСКОЙ ЛЕД — ОКЕАН — АТМОСФЕРА В АРКТИКЕ

Е.В. Заболотских¹, Б. Шапрон^{2, 1}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, liza@rshu.ru

² Институт исследований моря (Ifremer), Брест, Франция

Изучение изменчивости интегральных параметров влагосодержания атмосферы в Арктике проводится с использованием данных реанализа Era-Interim. Выполнено численное моделирование радиояркостной температуры (T_b) микроволнового излучения системы морской лед — океан — атмосфера. Проведение расчетов величины T_b с использованием данных реанализа и опубликованных коэффициентов излучения морского льда позволило получить оценку вклада атмосферных параметров в общее излучение системы в зависимости от сезона и типа подстилающей поверхности.

Ключевые слова: физическое моделирование, микроволновое излучение, AMSR2, Арктика, параметры влагосодержания атмосферы.

INTEGRATED ATMOSPHERIC WATER PARAMETER INFLUENCE ON THE ARCTIC SEA ICE — OCEAN — ATMOSPHERE MICROWAVE RADIATION

E.V. Zabolotskikh¹, B. Chapron^{2, 1}

¹ Russian State Hydrometeorological University

² French Research Institute for Exploitation of the Sea (Ifremer), Brest, France

Era-Interim re-analysis data is explored to study integrated atmospheric water parameters variability over the Arctic area. Physical modeling of the microwave radiation brightness temperature (T_b) over the sea ice — ocean — atmosphere system is fulfilled. T_b calculation with re-analysis data and published data on the sea ice emissivity provided means to estimate the contribution of the atmospheric water into the total microwave radiation of the system dependently on the season and type of the underlying surface.

Keywords: physical modeling, microwave radiation, AMSR2, Arctic, atmospheric water parameters.

Введение

Данные спутниковых микроволновых радиометров в Арктическом регионе являются практически единственным регулярным источником всепогодной информации о состоянии арктической системы. Прозрачность атмосферы в длинноволновой части микроволнового спектра ($\nu < 100$ ГГц) позволяет независимо от погодных условий получать оперативную информацию о подстилающей поверхности и атмосфере. Более того, эра функционирования хорошо калиброванных

микроволновых радиометров начиная с 1978 г. открыла возможности построения долговременных климатических рядов параметров, восстановленных по данным измерений спутниковых микроволновых радиометров, анализ которых позволяет изучать изменения климата [31]. Существенным достоинством данных спутниковых микроволновых радиометров является их многоканальность, позволяющая восстанавливать одновременно целый ряд параметров атмосферы, океана и морского льда на основе разделения вкладов влияния разных геофизических параметров на излучение на разных частотах.

Вместе с тем, если над открытыми районами океана такие параметры влагосодержания атмосферы, как ее интегральный влагозапас (WVC, water vapor content) и водозапас облаков (CWC, cloud liquid water content), восстанавливаются с высокой точностью, над территориями, покрытыми морским льдом, такое восстановление становится проблемой из-за высоких значений коэффициента излучения морского льда. Для обозначения интегрального влагозапаса атмосферы в англоязычной литературе используются, помимо WVC, также другие термины, например Total Precipitable Water (TPW), Integrated Water Vapor (IWP). Влагозапас атмосферы и водозапас облаков изменчивы как в пространстве, так и во времени.

Карты данных параметров с высоким временным разрешением в полярных районах позволяют судить о положении атмосферных фронтов и движении воздушных масс. Информация о пространственном распределении параметров влагосодержания атмосферы, их сезонной и межгодовой изменчивости представляет исключительную важность для решения различных метеорологических и климатических задач [1, 5]. Тем не менее она, по сути, отсутствует над обширными территориями Арктики.

Анализ изменчивости влагозапаса Арктики на основе данных радиозондирования не позволяет получить пространственную картину [2]. Из-за постоянного наличия облачности и полярной ночи в Арктике невозможно на регулярной основе использовать методы, основанные на использовании видимого [29, 30], ближнего инфракрасного [9] и инфракрасного (ИК) [22] диапазонов электромагнитного спектра. Единственным источником данных широкого пространственного охвата для всего Арктического региона остаются данные спутниковых микроволновых радиометров. Однако ни одна из опубликованных к настоящему времени методики определения указанных параметров по данным микроволновых радиометров над поверхностями, отличными от морской поверхности, не нашла применения в оперативных алгоритмах при создании соответствующих спутниковых продуктов [12, 13, 18, 19].

Эти методики были предложены сравнительно недавно. Одна из них использует поляризационные измерения на частотных каналах, близких к частоте резонансного поглощения водяного пара частотами [12]. Метод основан на гипотезе об одинаковых коэффициентах излучения подстилающей поверхности на близких частотах. Это предположение лежит в основе параметризации поляризационной разности измерений в зависимости от влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и температуры поверхности. Зондирование атмосферы с использованием измерений вблизи сильной линии поглощения водяного пара на частоте 183 ГГц

позволяет восстанавливать не только интегральную влажность атмосферы, но и профили влажности [10, 14]. В Арктике, однако, эти методы использовать проблематично, поскольку значения влагозапаса слишком малы по сравнению с высоким и изменчивым излучением льда. В ряде работ предложены подходы для восстановления влагозапаса атмосферы над морским льдом [18, 19, 21], но их использование ограничено сухой атмосферой, влагозапас которой не превышает 7 кг/м^2 .

Таким образом, хотя в области развития методов восстановления интегральных параметров влагосодержания атмосферы по данным спутниковых измерений достигнут значительный прогресс, единственными данными для анализа изменчивости этих параметров в Арктике по-прежнему остаются данные моделей, анализов и реанализов, несмотря на их низкую точность применительно к влагозапасу атмосферы и водозапасу облаков [23].

В настоящей работе решались две задачи. Во-первых, с использованием данных реанализа Era-Interim по WVC, CWC и содержанию в облаках льда (IWC, ice water content) за период в один год изучалась пространственно-временная изменчивость этих параметров в Арктике над морским льдом и над открытыми районами океана. Во-вторых, с использованием численного моделирования микроволнового уходящего излучения системы морской лед — океан — атмосфера были рассчитаны микроволновые характеристики атмосферы и оценено их влияние на общее излучение системы над разными типами подстилающих поверхностей (лед, вода) для изучения возможности выделения атмосферной составляющей излучения и последующего восстановления параметров атмосферы. При расчетах использовались данные Era-Interim по профилям метеорологических параметров и параметрам подстилающей поверхности, а также опубликованные данные по характеристикам излучения морского льда. Моделирование проводилось для параметров каналов измерений японского спутникового микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2).

Методология и данные

В работе использовались данные реанализа Era-Interim по интегральному влагозапасу атмосферы WVC, общему водозапасу облаков CWC, содержанию льда в облаках IWC, сплоченности ледяного покрова SIC, эффективной температуре льда SIT, температуре поверхности океана SST, скорости приводного ветра SWS, а также по атмосферному давлению, температуре и влажности воздуха, водности и ледности облаков [11] с разрешением $0,75 \times 0,75^\circ$. Эти данные были скачаны с ресурса центра данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) (<http://apps.ecmwf.int/>) для региона севернее 60°с.ш. для 2015 г. Данные реанализа Era-Interim были выбраны среди других реанализов, поскольку реанализы ECMWF в целом наилучшим образом согласуются с данными наблюдений [4].

Численное моделирование радиояркой температуры микроволнового излучения системы морской лед — океан — атмосфера было выполнено для условий

нерассеивающей атмосферы для сравнительной оценки вкладов подстилающей поверхности и атмосферы в общее излучение системы, а также интегрального поглощения в атмосфере над разными типами поверхностей. Для областей с $SIC > 0$ для введения в расчеты информации по параметрам ледяного покрова были проанализированы опубликованные за последние годы данные экспериментальных измерений и модельных расчетов коэффициентов излучения морского льда [7, 20, 26, 27, 32]. Обобщение опубликованных результатов позволило произвести систематизацию параметров излучения по типам льда. В результате были выделены три типа ледяного покрова в Арктике: условно многолетний, условно однолетний и условно молодой. Слово «условно» используется, поскольку коэффициент излучения зависит от многих факторов: структуры ледяного покрова, наличия и свойств снежного покрова, состояния таяния или замерзания и других.

Для базы данных были зафиксированы три типа льда с изменчивыми коэффициентами излучения от 0,5 до 0,95 с сохранением экспериментально подтвержденных спектральных соотношений [16, 24]. Моделирование было выполнено для параметров измерений спутникового сканирующего микроволнового радиометра AMSR2 на борту спутника GCOM-W1. Данный радиометр измеряет микроволновое излучение на частотах 6,9; 7,3; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5 и 89 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации. Использовалась упрощенная форма одномерного уравнения переноса излучения в приближении «чистого поглощения». Погрешность такого приближения определяется параметром λ/r , где λ — длина волны излучения, r — размер гидрометеора, и для частот 6,9; 7,3; 10,65; 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц не превышает шумов радиометра [6]. Поскольку, помимо этих частот, использовалась также частота 89 ГГц, для уверенности в отсутствии рассеяния данные по профилям содержания льда в облаках и температуре воздуха использовались для оценки эффективного радиуса кристаллов ρ , который должен удовлетворять условию $\lambda/2\pi\rho \gg 1$ [25]. Для самого коротковолнового канала AMSR2 $\sim 0,3$ см (89 ГГц) это условие накладывает ограничение $\rho \ll 500$ мкм.

Для угла зондирования θ AMSR2, равного 55° , атмосфера может рассматриваться как плоскостроистая среда. При подтвержденных условиях отсутствия рассеяния упрощенная форма одномерного уравнения переноса излучения в приближении «чистого поглощения» будет иметь вид

$$\mu \frac{dT_a(h)}{dh} = -\alpha_n(h)T_a(h) + \alpha_n(h)T(h), \quad (1)$$

где $\mu = \cos\theta$; h — вертикальная координата; $T(h)$ — температура атмосферы; α_n — коэффициент поглощения, зависящий от температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и водности облака.

Решение уравнения (1) с учетом граничных условий на верхней границе атмосферы и на подстилающей поверхности представляет собой сумму восходящего излучения атмосферы, нисходящего излучения атмосферы, отраженного подстилающей поверхностью (r_{eff} — эффективный коэффициент отражения поверхности), излучения поверхности и космического излучения, величина которого не превышает значений порядка 1 К над водой и 0,7 К над морским льдом:

$$T_{\text{я}} = T_a^{\uparrow} + \left[r_{\text{eff}} T_a^{\downarrow} + T_{s_eff} + 2.7 r_{\text{eff}} e^{-\tau} \right] e^{-\tau}, \quad (2)$$

$$T_0^{\uparrow} = e^{-\tau} \int_0^{\infty} T(h) \alpha_n(h) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_h^{\infty} \alpha_n(h') dh'\right) dh, \quad (3)$$

$$T_0^{\downarrow} = \int_0^{\infty} T(h) \alpha_n(h) \exp\left(-\int_0^h \alpha_n(h') dh'\right) dh, \quad (4)$$

$$\tau = \int_0^{\infty} \alpha_n(h') dh', \quad (5)$$

где τ — оптическая толщина атмосферы, h — координата вдоль направления сканирования,

$$T_{s_eff} = \sum_n C_n \varepsilon_{icen} T_{icen} + \left(1 - \sum_n C_n\right) \varepsilon_w T_w, \quad (6)$$

$$r_{\text{eff}} = 1 - \left(\sum_n C_n \varepsilon_{icen} + \left(1 - \sum_n C_n\right) \varepsilon_w \right). \quad (7)$$

Эффективное излучение поверхности определяется сплоченностью морского льда, а если в элементе разрешения присутствует n типов льда с разными коэффициентами излучения, то значениями частной сплоченности C_n , температуры льда и воды и коэффициента излучения морской поверхности.

При расчете излучения морской воды использовалась геофизическая модельная функция, представленная в [33], и модель диэлектрической проницаемости [17]. При расчете поглощения микроволнового излучения кислородом и водяным паром использовались аппроксимационные методики [15] и [28] соответственно. Коэффициент поглощения микроволнового излучения жидкокапельной фракцией облаков рассчитывался по приближенной методике [15].

Результаты

Статистический анализ данных Era-Interim по интегральным параметрам влагосодержания атмосферы позволил получить среднемесячные, минимальные и максимальные значения WVC, CWC, IWC, их среднеквадратичные отклонения и исследовать их пространственное распределение в Арктике. На рис. 1—3 представлены среднемесячные значения WVC, CWC и IWC, их минимальные и максимальные значения и зона разброса, определяемая как среднее значение \pm среднеквадратичное отклонение (СКО) над свободной от льда морской поверхностью и над морским льдом в Арктике для зоны 60—90° с.ш.

Анализ рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что вопреки устоявшемуся убеждению о чрезвычайно сухой атмосфере в Арктике зимой над морским льдом

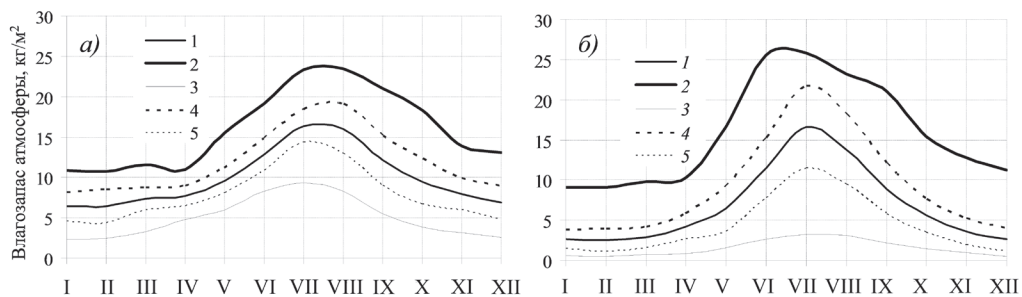


Рис. 1. Внутригодовая изменчивость влагозапаса атмосферы (WVC) для зоны 60—90° с.ш. за 2015 г.

a — над свободными от льда районами океана, *б* — над морским льдом; 1 — среднее значение, 2 — максимальное, 3 — минимальное, 4 — среднее значение минус СКО, 5 — среднее значение плюс СКО.

максимальные значения влагозапаса атмосферы там в зимние месяцы (около 10 кг/м²) над льдом лишь незначительно ниже максимальных значений над открытой водой. Зимой заток влажных воздушных масс в районы Арктики, покрытые морским льдом, наблюдается с северной части Тихого океана чаще, чем с Северной Атлантики. Распространение этих влажных воздушных масс в глубь арктических морских льдов чаще всего ограничено периферийными морями. Однако иногда наблюдаются случаи продвижения влажного воздуха с образованием жидкокапельной влаги к полюсу. Так, например, из рис. 2 видно, что средние значения влагозапаса зимой над морским льдом составляют 2—3 кг/м², а над водой — в три раза выше: 6—7 кг/м². При этом над открытыми районами океана интегральная влажность не опускается ниже 2,5 кг/м², в то время как над льдом воздух может быть исключительно сухим: WVC не превышает 0,5 кг/м².

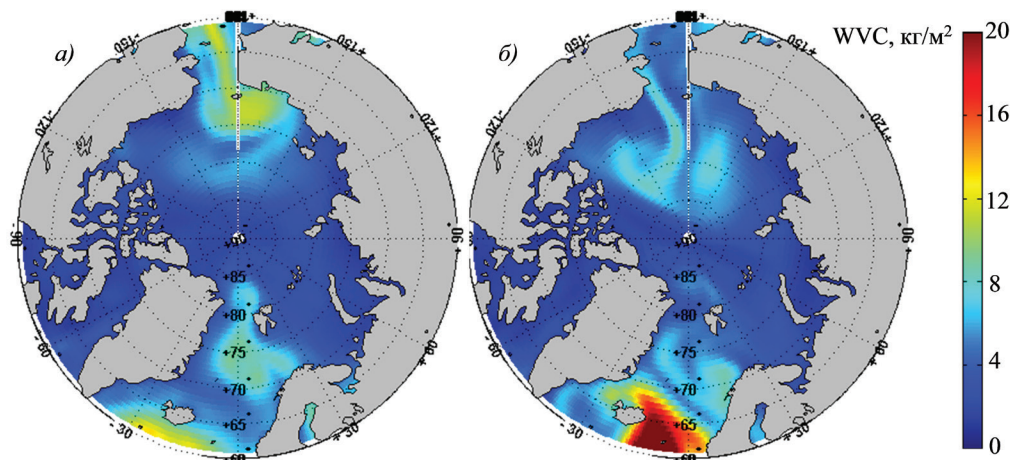


Рис. 2. Распределение влагозапаса атмосферы (WVC) в Арктике по данным Era-Interim. *a* — 4 января 2015 г., *б* — 5 января 2015 г.

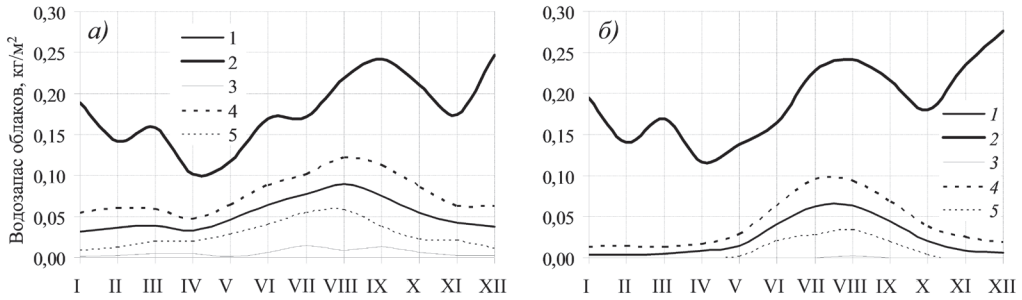


Рис. 3. Внутригодовая изменчивость водозапаса облаков (CLW) для зоны 60—90° с.ш. за 2015 г.

a — над свободными от льда районами океана, *б* — над морским льдом;
 1 — среднее значение, 2 — максимальное, 3 — минимальное,
 4 — среднее значение минус СКО, 5 — среднее значение плюс СКО.

Для сезонного увеличения влажности воздуха весной и уменьшения осенью над открытыми водными пространствами в Арктике характерен плавный ход. Над морским льдом сезонные изменения более резкие: с декабря по март средние значения водозапаса практически не изменяются. Зимой изменчивость максимальных значений водозапаса над морским льдом также практически отсутствует. Предположительно это связано с равномерно распределенной по зимнему сезону повторяемостью внетропических циклонов, которые приносят влажный воздух в Арктику [3, 8]. Максимальные среднемесячные значения WVC наблюдаются в июле — августе и составляют около 16 кг/м². При этом разброс WVC вокруг средних значений над водой невелик и равен примерно 2—3 кг/м², практически не изменяясь от зимы к лету. Над льдом в летний период СКО значений WVC существенно больше — около 5 кг/м². Зимой СКО составляет 1,2—1,6 кг/м².

На рис. 3 представлена изменчивость общего содержания жидкокапельной влаги облаков (водозапаса) в Арктике над морской водой и над морским льдом. Из рисунка видно, что зимой среднемесячные значения водозапаса облаков (~0,03 кг/м²) над водой существенно больше, чем над льдом (~0,004 кг/м²). В летние месяцы подобное превышение также имеет место, хотя оно и не столь существенно (0,09 кг/м² относительно 0,06 кг/м²).

Анализ ежедневных карт распределения водозапаса облаков позволяет сделать вывод о том, что зимой основной вклад в водозапас арктических облаков вносит облачность морей Североевропейского бассейна. Летом водозапас облаков в районе морей восточной Арктики и морей Североевропейского бассейна одинаковый. Ни водозапас облаков, ни содержание льда в облаках не являются настолько климатически значимыми параметрами, как водозапас атмосферы. Содержание влаги в облаках в кристаллической и жидкой форме на два порядка меньше, чем интегральное содержание парообразной влаги в атмосфере. Верификация данных моделей, анализов и реанализов практически невозможна, поскольку прямые регулярные измерения CLW и IWC отсутствуют. Поэтому мы ограничим детальность анализа полученных результатов лишь самыми общими выводами.

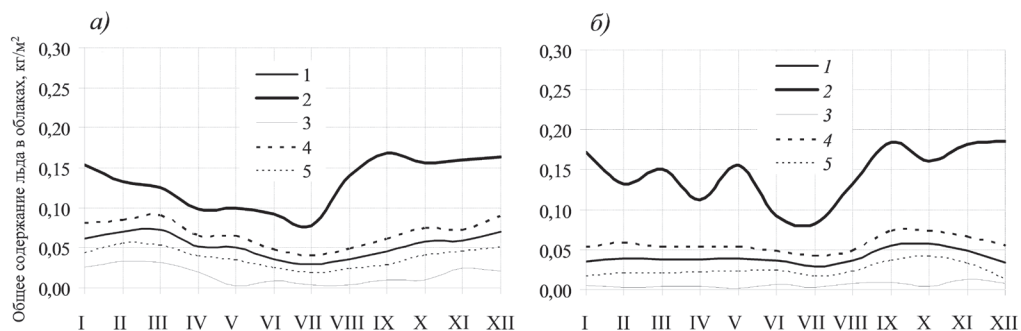


Рис. 4. Внутригодовая изменчивость общего содержания льда в облаках (IWC) для зоны 60—90° с.ш. за 2015 г.

a — над свободными от льда районами океана, *б* — над морским льдом;
 1 — среднее значение, 2 — максимальное, 3 — минимальное, 4 — среднее значение минус СКО, 5 — среднее значение плюс СКО.

Сезонное распределение среднемесячных значений общего содержания льда в облаках (IWC) в Арктике отличается большей равномерностью относительно водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы. Летом, в июле, наблюдается минимум (около 0,03 кг/м²), не зависящий от типа подстилающей поверхности. Значения IWC над водой зимой составляют ~0,06 кг/м² и лишь в 1,5 раза превышают значения IWC над морским льдом. В пространственном распределении облачной влаги (IWC и CLW) как зимой, так и летом выделяется район Гренландского моря, для которого характерна наибольшая повторяемость облачности с высоким содержанием воды в кристаллической и жидкой фазе (рис. 5).

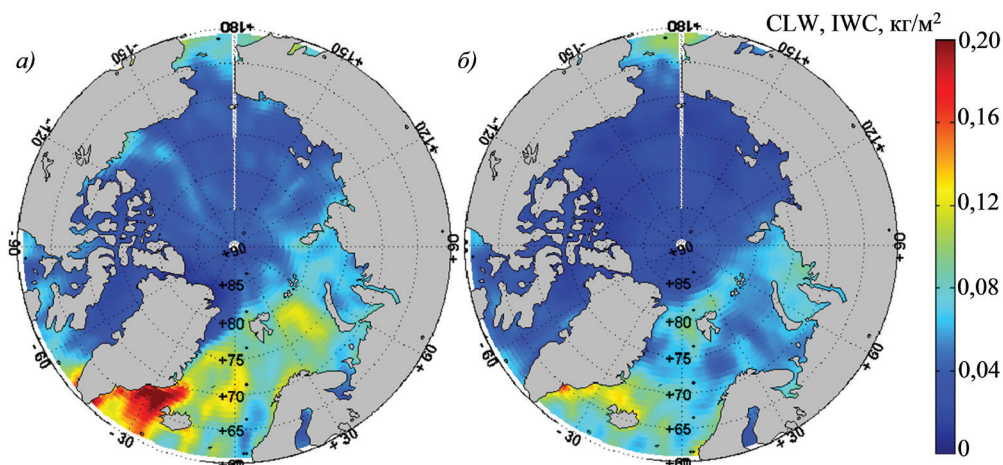


Рис. 5. Распределение среднемесячных значений интегральных характеристик влагосодержания облаков в Арктике по данным Era-Interim за 2015 г.

a — водозапас облаков (CLW) в сентябре, *б* — общее содержание льда в облаках (IWC) в декабре.

Расчеты радиояркой температуры $T_{\text{я}}$ микроволнового излучения системы морской лед — океан — атмосфера для характеристик каналов измерений AMSR2 позволили оценить вклад атмосферных параметров в общее излучение системы в зависимости от сезона и типа подстилающей поверхности.

На рис. 6 представлено сезонное изменение интегрального поглощения микроволнового излучения на частоте 89 ГГц (ее оптической толщины τ_{89}) в Арктике над водой и над морским льдом.

Низкие значения τ_{89} зимой ($\tau_{89} < 0,2$) над арктическим морским льдом позволяют говорить о возможности изучения свойств морского льда со сравнительно высоким пространственным разрешением 3×3 км с использованием измерений на каналах 89 ГГц. При $\tau_{89} < 0,2$ атмосферное излучение может быть представлено в виде

$$T_0^{\uparrow} \sim T_0^{\downarrow} \approx \tau T_{\text{эфф}}, \quad (8)$$

где $\tau \equiv \tau_{89}$, т.е. микроволновое излучение атмосферы пропорционально ее интегральному поглощению с коэффициентом пропорциональности, равным средней эффективной температуре атмосферы. В соответствии с выполненными расчетами это справедливо лишь шесть месяцев в году: с января по апрель, а также в ноябре и декабре над морским льдом.

Вариации атмосферного излучения на частоте 89 ГГц над морским льдом составляют от 30 до 150 К, над морской водой — от 60 до 130 К. С использованием массивов расчетных значений $T_{\text{я}}$ был проведен анализ чувствительности $T_{\text{я}}$ к влагозапасу атмосферы WVC и водозапасу облаков CLW в зависимости от концентрации льда (его сплоченности) для разных каналов измерений. Оказалось, что в диапазоне сплоченности льда от 15 % (кромка льда) до 50 % чувствительность $T_{\text{я}}$ к WVC и CLW сохраняется (превышает шумы радиометра) на каналах измерений, регистрирующих излучение на частотах 23,8 и 89 ГГц. На всех остальных частотах рассчитанные значения чувствительности ($\delta T_{\text{я}}/\delta \text{WVC}$ и

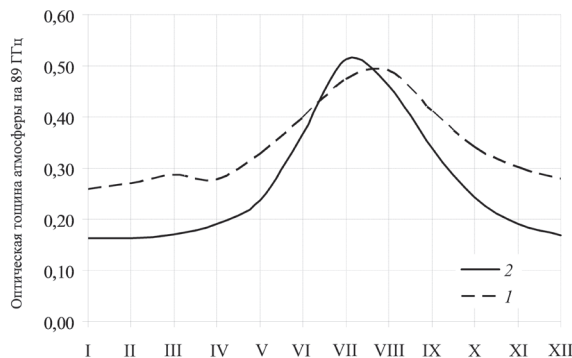


Рис. 6. Годовой ход оптической толщины атмосферы на частоте 89 ГГц (τ_{89}), обусловленной жидкокапельной и парообразной влагой, для зоны $60\text{--}90^\circ$ с.ш. за 2015 г.

1 — над открытой водой, 2 — над морским льдом.

$\delta T_{\text{я}}/\delta \text{CLW}$) оказались меньше шумов на соответствующих каналах. Следовательно, измерения на каналах 23,8 и 89 ГГц потенциально могут быть использованы для восстановления параметров WVC и CLW в районе кромки морского льда при значениях сплоченности, не превышающих 50 %.

Доля атмосферного излучения в общем излучении системы морской лед — океан — атмосфера зависит от эффективного коэффициента излучения подстилающей поверхности ϵ . При этом, чем выше ϵ , тем более явно выражена зависимость регистрируемого суммарного излучения системы от излучения подстилающей поверхности и тем меньше оно зависит от свойств атмосферы.

Выводы

В настоящей работе проведен анализ пространственно-временной изменчивости параметров влагосодержания атмосферы в Арктике с использованием данных реанализа Era-Interim за 2015 г. Численное моделирование микроволнового излучения системы морской лед — океан — атмосфера для каналов измерений спутникового радиометра AMSR2 позволило оценить влияние этих параметров на общее микроволновое излучение над морским льдом и над открытыми районами океана.

Анализ сезонной изменчивости и пространственного распределения влагозапаса атмосферы позволил сделать вывод о том, что средние значения влагозапаса зимой над морским льдом в три раза ниже, чем над водой. Над морским льдом сезонные изменения с декабря по март практически отсутствуют. Максимальные среднемесячные значения влагозапаса атмосферы одинаковы над разными типами подстилающей поверхности и наблюдаются в июле — августе.

Зимой среднемесячные значения водозапаса облаков над водой существенно превышают значения водозапаса над льдом. В летние месяцы превышение также наблюдается, хотя и не столь существенное. Зимой основной вклад в водозапас облаков Арктического региона вносит облачность морей Североевропейского бассейна, а летом средний водозапас облаков над разными областями Арктики примерно одинаковый. Содержание влаги в облаках в кристаллической и жидкой форме на два порядка меньше, чем интегральное содержание парообразной влаги в атмосфере.

По результатам расчета интегрального поглощения в атмосфере на канале 89 ГГц (τ_{89}) с января по апрель, в ноябре и декабре наблюдаются низкие значения τ_{89} над морским льдом, обеспечивающие возможность изучения свойств морского льда с пространственным разрешением 3×3 км. В летнее время вариации атмосферного излучения на канале 89 ГГц ($T_{\text{я}89}$) над морским льдом и над водой сравнимы по величине, что позволяет в летнее время использовать высокочастотные каналы для восстановления параметров атмосферы. Анализ чувствительности $T_{\text{я}}$ к влагозапасу атмосферы WVC и водозапасу облаков CLW показал, что в диапазоне сплоченности льда от 15 до 50 % чувствительность $T_{\text{я}}$ к WVC и CLW превышает шумы радиометра на каналах измерений 23,8 и 89 ГГц. Следовательно, измерения на этих каналах могут быть использованы для восстановления

параметров WVC и CLW над морским льдом при значениях сплоченности, не превышающих 50 %.

Доля атмосферного излучения в общем излучении системы морской лед — океан — атмосфера определяется эффективным коэффициентом излучения поверхности: чем он выше, тем меньше суммарное излучение системы зависит от свойств атмосферы.

Исследования, представленные в настоящей работе, выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 17-77-30019.

Список литературы

1. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Бобылев Л.П., Уразгильдеева А.В., Гнатюк Н.В. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на летнее потепление в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3. С. 67—77.
2. Бурова Л.П. Влагооборот атмосферы в Арктике. / Л.: Гидрометеоздат, 1983. 127 с.
3. Васильева П.В., Заболотских Е.В., Шапрон Б. Сравнительный анализ характеристик внетропических циклонов в Северной Атлантике и северной части Тихого океана по данным реанализа ERA-Interim и спутникового радиометра AMSR-E // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018 (в печати).
4. Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В. К вопросу о возможности использования данных ERA-40 и NCEP/NCAR реанализов для изучения климата в Северной полярной области // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 44—67.
5. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3—11.
6. Нгуен Т.Т., Чукин В.В. Модель рассеяния электромагнитных волн на каплях воды и фрактальных кристаллах льда // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 93—101.
7. Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии // Исследования Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29—36.
8. Топтунова О.Н., Анискина О.Г. Идентификация циклонов по результатам реанализа // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 37. С. 59—66.
9. Albert P., Bennartz R., Preusker R., Leinweber R., Fischer J. Remote sensing of atmospheric water vapor using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer // J. Atmos. and Oceanic Technol. 2005. No. 3 (22). P. 309—314.
10. Bernardo F., Aires F., Prigent C. Atmospheric water-vapour profiling from passive microwave sounders over ocean and land. Part II: Validation using existing instruments // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2013. No. 673 (139). P. 865—878.
11. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P. [и др.]. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2011. No. 656 (137). P. 553—597.
12. Deeter M.N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // Geophys. Res. Lett. 2007. No. 2 (34). P. L02815.
13. Deeter M.N., Vivekanandan J. New dual-frequency microwave technique for retrieving liquid water path over land // J. Geophys. Res.: Atmospheres (1984—2012). 2006. No. D15 (111). doi: 10.1029/2005JD006784.
14. Karbou F., Aires F., Prigent C., Eymard L. Potential of Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) and AMSU-B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land // J. Geophys. Res.: Atmospheres (1984—2012). 2005. No. D7 (110). doi: 10.1029/2004JD005318
15. Liebe H.J., Layton D.H. Nat. Tech. Inf. Service Boulder, CO. Millimeter-wave properties of the atmosphere: Laboratory studies and propagation modeling, 1987. NTIA Rep. 87-24.

16. *Mathew N., Heygster G., Melsheimer C.* Surface emissivity of the Arctic sea ice at AMSR-E frequencies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. No. 12 (47). P. 4115—4124.
17. *Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. No. 9 (42). P. 1836—1849.
18. *Melsheimer C., Heygster G., Mathew N., Pedersen L.T.* Retrieval of sea ice emissivity and integrated retrieval of surface and atmospheric parameters over the Arctic from AMSR-E data // J. Remote Sensing Society of Japan. 2009. No. 1 (29). P. 236—241.
19. *Melsheimer C., Heygster G.* Improved retrieval of total water vapor over polar regions from AMSU-B microwave radiometer data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. No. 8 (46). P. 2307—2322.
20. *NORSEX Group.* Norwegian remote sensing experiment in a marginal ice zone // Science. 1983. No. 4599 (220). P. 781—787.
21. *Perro C., Lesins G., Duck T., Cadeddu M.* A microwave satellite water vapour column retrieval for polar winter conditions // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. 2015. No. 9 (8). P. 9959—9992.
22. *Schroedter-Homscheidt M., Drews A., Heise S.* Total water vapor column retrieval from MSG-SEVIRI split window measurements exploiting the daily cycle of land surface temperatures // Remote Sensing of Environment. 2008. No. 1 (112). P. 249—258.
23. *Serreze M.C., Barrett A.P., Stroeve J.* Recent changes in tropospheric water vapor over the Arctic as assessed from radiosondes and atmospheric reanalyses // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2012. No. D10 (117). doi: 10.1029/2011JD017421
24. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // J. Geophys. Res.: Oceans (1978—2012). 2008. No. C2 (113). doi: 10.1029/2005JC003384
25. *Sun Z., Rikus L.* Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations // Quart J. Roy. Met Soc. 1999. No. 560 (125). P. 3037—3055.
26. *Troy B.E., Hollinger J.P., Lerner R.M., Wisler M.M.* Measurement of the microwave properties of sea ice at 90 GHz and lower frequencies // J. Geophys. Res.: Oceans. 1981. No. C5 (86). P. 4283—4289.
27. *Tucker W.B., Grenfell T.C., Onstott R.G., Perovich D.K., Gow A.J., Snuchman R.A., Sutherland L.L.* Microwave and physical properties of sea ice in the winter Marginal Ice Zone // J. Geophys. Res.: Oceans. 1991. No. C3 (96). P. 4573—4587.
28. *Turner D.D., Cadeddu M.P., Lohnert U., Crewell S., Vogelmann A.M.* Modifications to the water vapor continuum in the microwave suggested by ground-based 150-GHz observations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters. 2009. No. 10 (47). P. 3326—3337.
29. *Wagner T., Beirle S., Sihler H., Mies K.* A feasibility study for the retrieval of the total column precipitable water vapour from satellite observations in the blue spectral range // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. No. 10 (6). P. 2593—2605.
30. *Wang H., Liu X., Chance K., González Abad G., Chan Miller C.* Water vapor retrieval from OMI visible spectra // Atmospheric Measurement Techniques. 2014. No. 6 (7). P. 1901—1913.
31. *Wentz F.J., Schabel M.* Precise climate monitoring using complementary satellite data sets // Nature. 2000. No. 6768 (403). P. 414—416.
32. *Wilheit T., Nordberg W., Blinn J., Campbell W., Edgerton A.* Aircraft measurements of microwave emission from Arctic sea ice // Remote Sensing of Environment. 1971. No. 2. P. 129—139.
33. *Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B.* An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans // Remote Sensing. 2014. No. 3 (6). P. 2317—2342.