

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ
ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-349-363>
УДК 551.51



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ОПЫТ ДИСТАНЦИОННОГО ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОД ДРЕЙФА
НЭС «АКАДЕМИК ТРЁШНИКОВ»

А.П. МАКШТАС^{*}, Г.Н. ИЛЬИН², В.Ю. БЫКОВ², Е.А. МИЛЛЕР³, А.В. ТРОИЦКИЙ⁴,
В.Ю. КУСТОВ¹, И.И. БОЛЬШАКОВА¹, Д.Д. РИЗЕ¹

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ — НПО «АТТЕХ», г. Долгопрудный, Россия

⁴ — Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород, Россия

*maksh@aari.ru

Резюме

Приведено описание работы комплекса аппаратуры влажно-температурного дистанционного зондирования нижнего слоя атмосферы (радиометр РВП и метеорологический профилемер МТР-5РЕ) в условиях Арктики. Выполнено сравнение результатов измерений радиометрических систем с данными аэрологического зондирования в широком спектре метеорологических условий. Получены оценки интегрального влагосодержания атмосферы и характеристик инверсий в нижнем 1000-метровом слое атмосферы в период дрейфа НЭС «Академик Трёшников» в северной части Баренцева моря.

Ключевые слова: влагосодержание, дистанционное зондирование, инверсия, полярная атмосфера, радиозондирование, радиометрический комплекс.

Для цитирования: Макштас А.П., Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Миллер Е.А., Троицкий А.В., Кустов В.Ю., Большакова И.И., Ризе Д.Д. Опыт дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы в период дрейфа НЭС «Академик Трёшников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 349 — 363. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-349-363>.

Поступила 15.07.2020

После переработки 24.08.2020

Принята 25.08.2020

THE EXPERIENCE OF REMOTE TEMPERATURE-WATER CONTENT
SOUNDING OF ATMOSPHERE DURING DRIFT
OF R/V “AKADEMIK TRYOSHNIKOV”

ALEKSANDR P. MAKSHAS¹*, GENNADII N. IL'IN², VLADIMIR YU. BYKOV², EVGENYA A. MILLER³,
ARKADY V. TROITSKY⁴, VASILY YU. KUSTOV¹, IRINA I. BOLSHAKOVA¹, DENIS D. RIZE¹

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

² — Institute of Applied Astronomy RAS, St. Petersburg, Russia

³ — R.P.O. "ATTEX", Dolgoprudny, Russia

⁴ — Scientific Research Radiophysical Institute, Nizhny Novgorod, Russia

*maksh@aari.ru

Summary

For the first time experience was gained with the operation of Russian equipment for water content and temperature remote sensing of the lower atmosphere in the Arctic. The comparison the results of measurements by radiometric systems with data of radiosoundings in wide range of meteorological conditions had been executed.

It is shown that mean difference between integral atmospheric water content, measured by water vapor radiometer WVR, and calculated from radiosoundings data does not exceed 6 % with standard deviation 0.54 kg/m² and significant correlation coefficient 0.92. Analysis the data of meteorological temperature profiler MTR-5 allows to conclude that in general its adequately reproduce air temperature profiles in the atmospheric lower 1000 m layer. Some deviations take place only in cases of large temperature gradients.

Preliminary analysis of WVR data showed that monthly mean value of integral atmospheric water content in area under study in April 2019 year practically coincides with calculated from radiosoundings, performed in 1983—1988 years at the polar station Barentsburg, nearest to the drift region, 3.61 and 3.62 kg/m² respectively. Same time hourly mean values of integral atmospheric water content during drift varied from 2 to 10 kg/m², with extreme values recorded between April 15 and April 20, probably due to intensive transport of air masses of the Atlantic origin.

Based on MTR-5 data it was concluded that despite differences in sounding technology, the place and time of observations, the statistics of inversions registered during drift correspond well to statistics of inversions, recorded on the Arctic coastal stations and over sea ice cover of the Weddell Sea in winter.

Keywords: inversion, polar atmosphere, radiometric complex, radiosounding, remote sensing, water content.

For Citation: Makshas A.P., Il'in G.N., Bykov V.Yu., Miller E.A., Troitsky A.V., Kustov V.Yu., Bolshakova I.I., Rize D.D. The experience of remote temperature-water content sounding of atmosphere during drift of R/V "Akademik Tryoshnikov". *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 349 — 363. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-349-363>.

Received 15.07.2020

Revised 24.08.2020

Accepted 25.08.2020

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление, начавшееся в конце XX в., существенно повлияло на состояние криосферы Арктики. В последние десятилетия зарегистрированы существенное уменьшение площади морского ледяного покрова, более раннее начало таяния снежного покрова, деградация вечной мерзлоты, интенсивное таяние ледников и увеличение эрозии берегов. Одним из критических факторов, определяющих траекторию изменения климатической системы Арктики, является состояние полярной атмосферы. При этом дефицит комплексных натурных данных о ее основных характеристиках, таких, как влагосодержание, облачность, парниковые газы, аэрозоли, и, соответственно, о процессах, их обуславливающих, ограничивает качество и адекватность результатов, полученных с помощью диагностических или прогностических совместных моделей «атмосфера — лед — океан — суша» [1]. В этой

связи в период подготовки и проведения Третьего Международного полярного года была создана Международная сеть полярных обсерваторий (IASOA), основной целью которой является обеспечение постоянного мониторинга состояния арктической атмосферы [2]. В Российской Арктике в 2010 — 2013 гг. были открыты обеспеченные современным научным оборудованием полярные обсерватории: Гидрометеорологическая обсерватория Тикси, Научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова» и Российский научный центр на Шпицбергене. В настоящее время в ААНИИ Росгидромета разрабатывается проект создания Арктической пространственно-распределенной обсерватории, основной задачей которой является оценка многолетних изменений и межгодовой изменчивости природной среды Российской Арктики, включая процессы теплового и динамического взаимодействия атмосферы, гидросферы и криосферы. Ее основой, кроме вышеперечисленных обсерваторий, будет постоянно действующая комплексная экспедиция на борту строящейся ледостойкой самодвижущей платформы (ЛСП).

В марте — апреле 2019 г. в период экспедиции «Трансарктика-2019» на борту НЭС «Академик Трёшников» были выполнены комплексные гидрометеорологические исследования [3], состав и качество которых могут послужить прообразом будущих работ на ЛСП. Важным компонентом метеорологического комплекса, развернутого на борту судна, были комплексы дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы, описанию которых, валидации полученных с их помощью данных и предварительным результатам исследований нижнего слоя атмосферы в северной части Баренцева моря посвящена настоящая статья.

КОМПЛЕКСЫ ДИСТАНЦИОННОГО ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ РВП И МТР-5РЕ

Современные наземные автоматические радиометрические комплексы дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА), измеряющие интенсивность собственного излучения атмосферы в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне длин волн, обеспечивают возможность получения данных о ряде параметров атмосферы в режиме реального времени. К таким параметрам относятся интегральное содержание водяного пара в столбе единичной площади (Q , кг/м²), водозапас облаков (W , кг/м²), характеристики температурного режима пограничного слоя атмосферы (до высоты 1000 м над местом установки). Первые два параметра измеряются двухчастотным СВЧ-радиометром водяного пара (РВП) по оценкам интенсивности излучения атмосферы в окрестностях линии излучения водяного пара 22,235 ГГц ($\vartheta_1 = 20,7$ ГГц и $\vartheta_2 = 31,4$ ГГц) [1]. По измеренным значениям интенсивности излучения, которую принято характеризовать эффективной радиояркостной температурой (РЯТ), вычисляются интегральные коэффициенты поглощения радиосигнала (оптическая толщина) $\tau(\vartheta_1)$, $\tau(\vartheta_2)$. С привлечением модели расчета затухания радиосигнала в атмосфере вычисляется коэффициент поглощения радиосигнала в кислороде $\tau_{-O_2}(\vartheta_{1,2})$ (URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/tus> (дата обращения 30.08.2020)) и составляется система уравнений, связывающая посредством расчетных коэффициентов значения поглощения в водяном паре $\Delta\tau(\vartheta_{1,2})$ с величинами Q и W [4, 5]. РВП оснащен встроенными датчиками температуры и давления воздуха, данные которых используются при расчетах. Погрешности датчиков не превышают 0,5 гПа и 1 °С, что не сказывается на точности расчетов Q и W . РВП также имеет емкостной индикатор осадков (V), фиксирующий в условных единицах интенсивность и продолжительность осадков, наличие которых может приводить к ошибкам в результатах измерений.

Для получения данных о вертикальном профиле температуры атмосферы в период экспедиции использовался аппаратный комплекс МТР-5РЕ, представляющий собой приемник, измеряющий интенсивность излучения атмосферы на низкочастотном склоне линии излучения кислорода (56,7 ГГц) [6, 7]. Комплекс МТР-5РЕ является модификацией температурного профилера [8], разработанной на основании выполненных в 1996 — 2010 гг. экспериментальных исследований в Арктике и Антарктике [9]. Прибор имеет ширину диаграммы направленности антенной системы 1° и возможность сканирования по углу места с малым шагом. Восстановление профиля температуры по спектру радиоярких температур решается методом статистической регуляризации. Параметры прибора позволяют выполнять измерения профиля температуры воздуха до высоты 1000 м с разрешением 10 м в нижних 100 м. Комплекс МТР-5РЕ адаптирован для работы при температурах до –80 °С и оснащен программным обеспечением с системой автоматической калибровки [4]. Модифицированный комплекс МТР-5РЕ производства НПО «АТТЕХ» в 2011 г. внесен в реестр средств измерений РФ под номером № 69577-17. Метрологические характеристики МТР-5РЕ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные метрологические характеристики температурного профилера МТР-5РЕ

Table 1

General metrological characteristics of the temperature profiler MTP-5

Высота, м	Средняя квадратическая ошибка, °С	Разрешение по высоте, м
50	0,25	10
100	0,30	25
200	0,40	50
300	0,50	75
400	0,70	100
600	0,90	150
800	1,00	200
1000	1,20	250

Радиометрические комплексы позволяют получить информацию о характеристиках нижнего слоя атмосферы с высоким временным разрешением (РВП — до 10 с и МТР-5РЕ — 180 с). При этом РВП и МТР-5РЕ отличаются высокой чувствительностью к изменению интенсивности радиоизлучения атмосферы, что позволяет практически исключить влияние аппаратных шумов на точность измеряемых параметров. Следует отметить, что совместно комплексы РВП и МТР-5РЕ до настоящего времени использовались в основном для исследований в средних широтах, поэтому одной из задач, решаемых в экспедиции «Трансарктика-2019» была оценка качества получаемой с их помощью информации в Арктике.

ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСОВ ДИСТАНЦИОННОГО ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ РВП И МТР-5РЕ

Метеорологический профилер МТР-5РЕ и радиометр водяного пара РВП были установлены на втором ярусе открытой палубы надстройки НЭС «Академик Трёшников» (рис. 1). Аэрологические зондирования атмосферы, данные которых использованы для валидации комплексов, производились с помощью навигационной

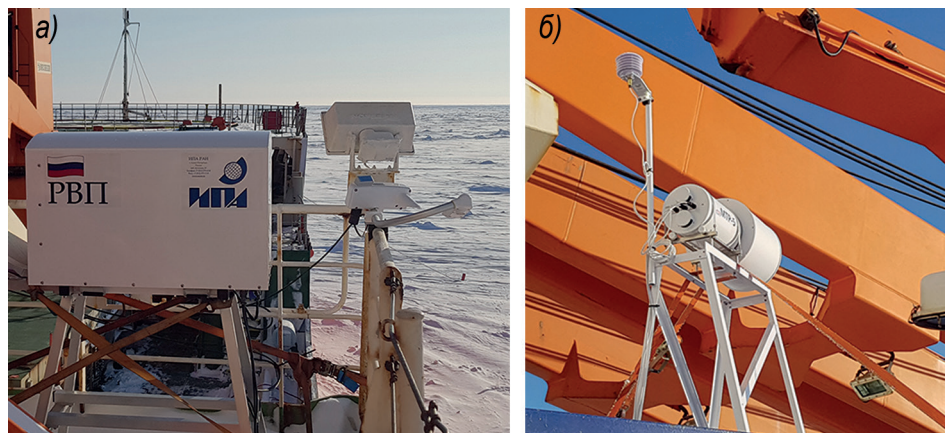


Рис. 1. Радиометр водяного пара РВП и метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ на палубе НЭС «Академик Трёшников»

Fig. 1. Water vapor radiometer WVR and meteorological temperature profiler MTR-5RE on the deck of R/V “Akademik Tryoshnikov”

базовой станции системы радиозондирования «Полюс-С» и радиозондов МРЗ-Н1 производства ОАО «Радий» (г. Касли, Россия).

На рис. 2 приведен корреляционный график величин влагосодержания атмосферы по данным измерений комплекса РВП и рассчитанных по данным двухразовых аэрологических зондирований для слоя 0 — 6 км, выполненных в период с 1 по 30 апреля 2019 г.

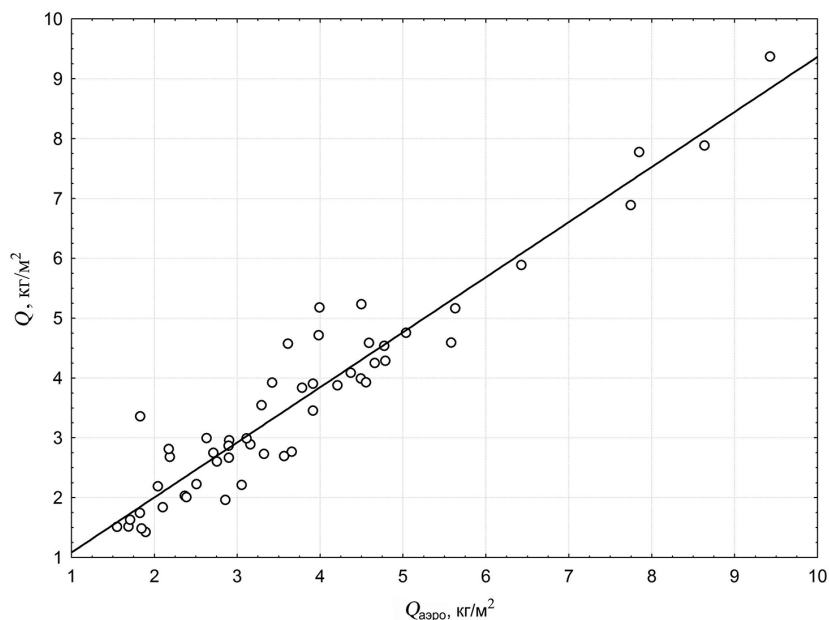


Рис. 2. Результаты сопоставления синхронных данных измерений РВП (Q) и влагосодержания шестикилометрового слоя атмосферы по данным радиозондирования ($Q_{\text{аэро}}$)

Fig. 2. Comparison the results of synchronous measurements of WVR (Q) and water content of the six-kilometer layer of atmosphere according to radiosoundings (Q_{aero})

В табл. 2 показано соответствие данных об интегральном влагосодержании атмосферы, измеренном с помощью РВП и рассчитанном для различных толщин слоя атмосферы по результатам 52 аэрологических зондирований. В первой строке таблицы приведены среднее, минимальное, максимальное значения и СКО величины интегрального влагосодержания атмосферы по всем среднечасовым значениям, полученным с помощью РВП в период дрейфа (Q РВП, 566 значений). В последующих строках показаны статистические характеристики разностей измеренных в сроки аэрологических зондирований значений влагосодержания атмосферы по данным РВП и рассчитанных для слоев 3, 4, 5, 6, 7 и 8 км по аэрологическим данным. В последнем столбце приведен коэффициент корреляции значений синхронизированных рядов измеренных и расчетных данных.

Таблица 2

Результаты сравнения величин интегрального влагосодержания атмосферы (Q , кг/м²) по данным РВП и аэрологических зондирований

Table 2

Comparison of integral atmospheric water content (Q , kg/m²) according to WVR and radiosounding data

Параметр	Среднее значение	Минимум	Максимум	СКО	Коэффициент корреляции
$Q_{\text{РВП}}$	3,61	1,43	9,37	1,72	—
$Q_{\text{РВП}} - Q_{3000}$	0,37	-0,63	2,15	0,65	0,89
$Q_{\text{РВП}} - Q_{4000}$	0,034	-0,85	1,68	0,57	0,91
$Q_{\text{РВП}} - Q_{5000}$	-0,13	-0,99	1,53	0,54	0,91
$Q_{\text{РВП}} - Q_{6000}$	-0,22	-1,04	1,50	0,54	0,92
$Q_{\text{РВП}} - Q_{7000}$	-0,26	-1,16	1,49	0,54	0,92
$Q_{\text{РВП}} - Q_{8000}$	-0,27	-1,22	1,48	0,54	0,92

Примечание. $Q_{\text{РВП}}$ — интегральное влагосодержание атмосферы (Q , кг/м²) по данным РВП, Q_{XXXX} м — влагосодержание слоя атмосферы от подстилающей поверхности до высоты XXXX, рассчитанное по аэрологическим данным

Note. $Q_{\text{РВП}}$ — integral water content of atmosphere (Q , kg/m²) according to WVR data, Q_{xxxx} — water content of atmospheric layer from underlying surface to the height xxxx, calculated from radiosoundings

Как видно из табл. 2, минимальное расхождение расчетных и измеренных величин Q имеет место при высоте слоя от 4 до 6 км при значимом на уровне 0,05 коэффициенте корреляции 0,91 — 0,92. Можно отметить некоторое занижение величин Q , зарегистрированных РВП, по отношению к оценкам Q по аэрологическим данным для слоев от 5 км и выше. Вероятно, это свидетельствует о пределе чувствительности РВП по высоте зондирования. Однако, учитывая возможные погрешности оценок влагосодержания по аэрологическим данным, обусловленные как собственно инструментальной погрешностью датчиков, так и изменением расстояния от точки запуска зонда и, соответственно, расположения РВП до местоположения зонда на различных высотах, результаты сравнения, как и качество данных об интегральном влагосодержании, можно считать в высшей степени удовлетворительными.

Относительно данных РВП о водозапасе облаков (W) следует отметить, что они носят оценочный характер в силу достаточно большой ошибки измерений [10] и могут скорее служить в качестве индикатора присутствия облаков различной мощности. То же самое можно сказать и о данных измерителя осадков, которые тем не

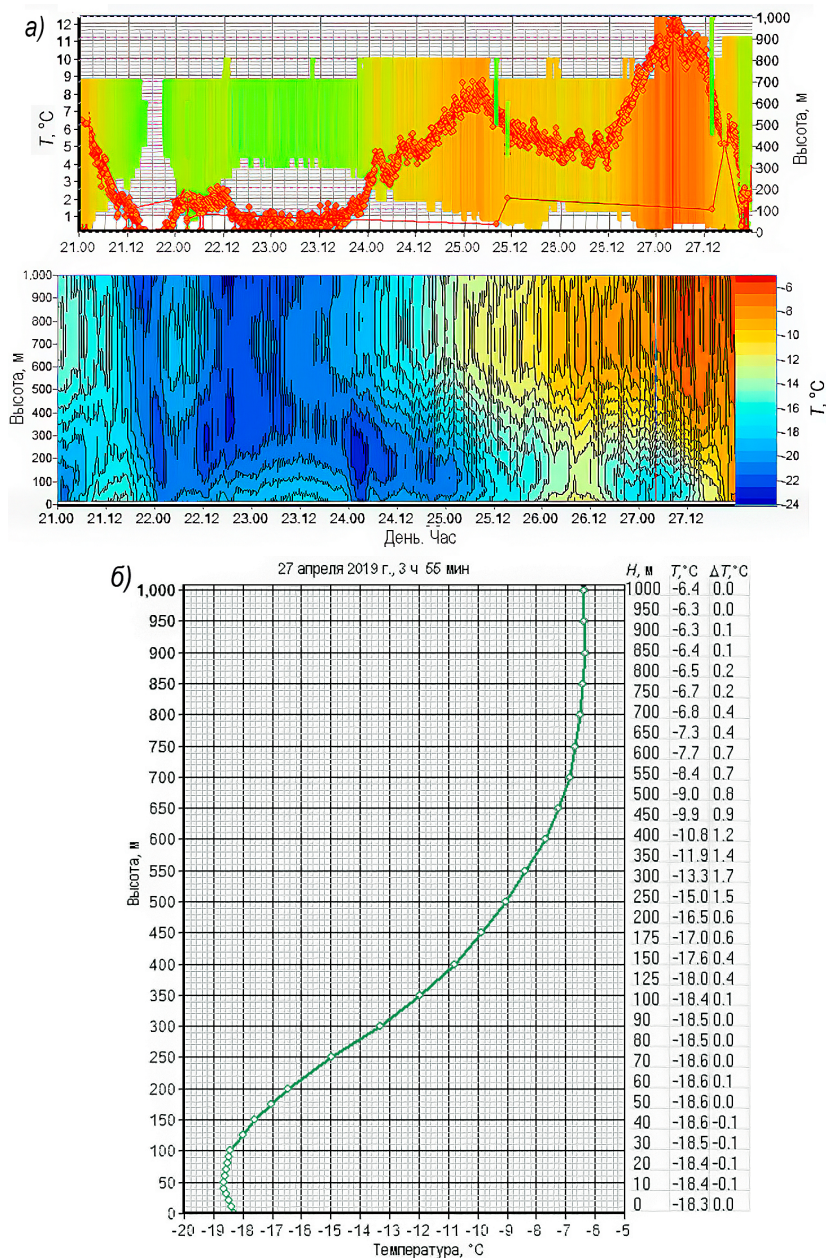


Рис. 3. Пример графического представления данных измерений аппаратного комплекса МТР-5РЕ. *a* — пространственно-временная изменчивость температуры воздуха в нижнем километровом слое атмосферы с 21 по 27 апреля 2019 г. (температура верхней границы инверсии — красная линия); *б* — профиль температуры воздуха в период максимального развития инверсионного слоя

Fig. 3. Example of graphical presentation the data of meteorological temperature profiler MTR-5RE. *a* — spatial-temporal variability of air temperature in the first kilometer of atmosphere during 21 — 27 April 2019 (temperature of inversion upper boundary — red line); *б* — profile of air temperature during of maximum development of the inversion layer

менее могут быть полезны при анализе метеорологических условий, при которых выполнялись измерения.

В отличие от радиометра РВП, который был использован для проведения измерений в полярных условиях впервые, эксплуатация метеорологического температурного профилера МТР-5 в Арктике и Антарктиде имеет длительную историю. Результаты комплексной валидации его данных описаны в работах [8, 9]. Сравнение данных МТР-5РЕ и данных радиозондирований, полученных в экспедиции, подтвердило, что в целом они адекватно воспроизводят профиль температуры воздуха в нижнем километровом слое атмосферы. Небольшие отклонения от профилей температуры, построенных по аэрологическим данным, имеют место лишь при больших ее градиентах. При этом следует подчеркнуть, что высокое разрешение МТР-5РЕ по высоте (от 10 до 50 м) и времени (180 с) позволяет детально и достаточно адекватно исследовать пространственно-временную изменчивость температуры воздуха в атмосферном пограничном слое (АПС). На рис. 3 в качестве примера получаемой с МТР-5РЕ информации, существенной для описания АПС, представлен эпизод с динамикой формирования температурных инверсий в период с 21 по 27 апреля, когда было достигнуто максимальное за весь период экспедиции значение мощности инверсии 12,3 °С при высоте ее нижней границы 75 м (27.04.2019 в 03:55).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НИЖНЕГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ПЕРИОД ДРЕЙФА

При интерпретации результатов мониторинга характеристик переноса солнечной и длинноволновой радиации в полярной атмосфере необходима регулярная информация о ее интегральном влагосодержании Q . До последнего времени основным источником такой информации являлись данные радиозондирований, проводимых на полярных и дрейфующих станциях. Обобщение этих данных за период 1959 — 1990 гг. было выполнено Л.П. Буровой в работах [11, 12]. Использование радиометра водяного пара РВП, регистрирующего Q с дискретностью 10 с и, как было показано выше, с высокой степенью достоверности, существенно расширяет возможности анализа, особенно при исследованиях прозрачности атмосферы, время проведения которых часто не совпадает с временем радиозондирований. Другим преимуществом использования РВП является возможность регистрации быстрых изменений состояния нижней атмосферы в результате прохождения над точкой наблюдений фронтальных зон, а также обусловленных суточным ходом солнечной радиации и ее влиянием на состояние приповерхностного и пограничного слоев атмосферы.

На рис. 4а представлены результаты измерений влагосодержания атмосферы, полученные в апреле 2019 г. в период дрейфа экспедиции «Трансарктика-2019» [3] к северу от архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Как видно из рисунка, влагосодержание атмосферы в районе работ изменялось в широких пределах, от 2 до 10 кг/м², с экстремальными значениями, зарегистрированными в период с 15 по 20 апреля. Анализ синоптических карт и данных радиозондирований показал, что в этот период имел место интенсивный западный перенос воздушных масс атлантического происхождения. Можно также отметить, на фоне синоптической изменчивости, относительно небольшой суточный ход Q .

Оставляя на будущее анализ роли пространственно-временной изменчивости влагосодержания атмосферы при описании процессов энергомассообмена подстила-

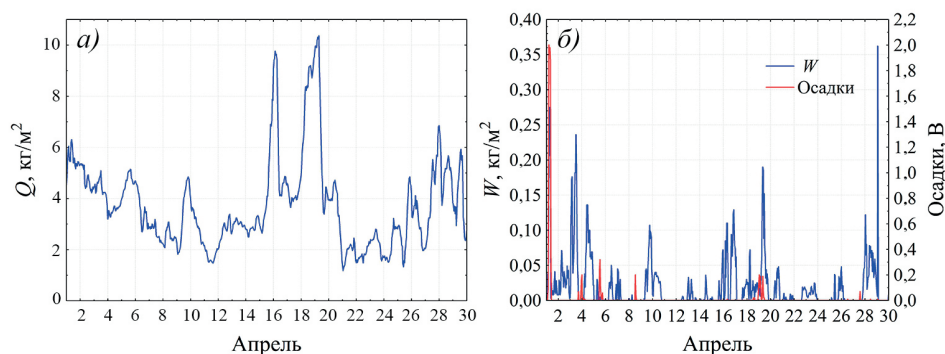


Рис. 4. Пространственно-временная изменчивость влагосодержания Q (а) и водозапаса облаков W и интенсивности осадков (б) в период дрейфа НЭС «Академик Трёшников»

Fig. 4. Spatial-temporal variability of water content Q (a), water capacity of clouds W , and intensity of precipitation (b) during drift of RV "Akademik Tryoshnikov"

ющей поверхности с атмосферой и совершенствовании существующих параметризаций длинноволновой и коротковолновой радиации в полярных районах, отметим интересный факт в области климатологии. Как следует из табл. 2, среднеемесячное значение Q в апреле по данным РВП составляет величину $3,61 \text{ кг/м}^2$. Приведенное в работе [12] среднеемесячное значение Q в апреле по данным аэрологических зондирований на ближайшей к району дрейфа полярной станции Баренцбург, выполненных в 1983 — 1988 гг., равно $3,62 \text{ кг/м}^2$. При этом, по данным [12], величины среднеемесячных значений Q за тот же период для расположенных в юго-западной части побережья Северного Ледовитого океана полярных станций о. Диксон и м. Челюскин составляют $2,8 \text{ кг/м}^2$ и $2,13 \text{ кг/м}^2$. Можно осторожно предположить, что указанное совпадение величин Q свидетельствует о многолетней устойчивости атмосферного переноса влаги в районе Шпицбергена.

На рис. 4б приведены данные о водозапасае облаков (W) и наличии осадков, полученные с помощью РВП. К сожалению, по информации создателей комплекса РВП, данные о W , представляющие собой результаты модельных расчетов, до настоящего времени не валидированы, поскольку для этого необходимы самолетные измерения в районе установки комплекса. Тем не менее они представляют известный интерес, поскольку содержат дополнительную информацию о наличии облачности и ее плотности. То же самое можно сказать в отношении данных измерителя осадков, позволяющих качественно оценить продолжительность и интенсивность осадков.

В заключение следует отметить, что радиометр водяного пара, продемонстрировавший в ходе экспедиции высокое качество получаемой с его помощью информации и надежность, развернут в ноябре 2019 г. на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» как составная часть приборного комплекса, осуществляющего мониторинг природной среды Российской Арктики.

Обращаясь к данным метеорологического профилера МТР-5РЕ, следует еще раз отметить, что с его помощью имеется возможность получать информацию о характере изменений температуры воздуха в атмосферном пограничном слое непосредственно в точке наблюдений с временной дискретностью 180 с и пространственной — от 10 до 50 м, недоступную по данным аэрологических зондирований, использовавшихся ранее для мониторинга состояния АПС в полярных районах [13,

Статистические характеристики инверсий
в период дрейфа НЭС «Академик Трёшников»

Table 3

Statistical characteristics of inversions during drift of RV “Akademik Tryoshnikov”

Параметр	Среднее значение	Минимум	Максимум	СКО
z_b	163	0	600	152
z_t	734	40	1000	239
$z_t - z_b$	571	40	1000	206
T_b	-167	-26,3	-2,6	5,1
T_t	-12,9	-22,6	-1,3	5,3
$T_t - T_b$	3,8	0,3	11,9	2,8

14]. Анализ процессов формирования АПС в районе работ экспедиции — тема будущих публикаций, в настоящей статье приведена информация об одной из наиболее важных его характеристик — структуре инверсионного слоя в нижней тропосфере (до высоты 1000 м).

При расчетах основных параметров инверсионного слоя использован программный продукт МТР-5РЕ, основанный на протоколе, предложенном в работе [13]. Следуя протоколу, производится сканирование по высоте каждого температурного профиля. Если температура на некотором уровне увеличилась, уровень непосредственно под ним полагается высотой нижней границы инверсии z_b с температурой T_b . При дальнейшем сканировании уровень, расположенный ниже уровня, с которого температура начинает понижаться, считается верхней границей инверсии с соответствующими высотой и температурой z_t и T_t . В период экспедиции инверсии нижнего уровня были идентифицированы в 82 % осредненных за каждый час профилей. Основные статистические характеристики зарегистрированных 533 инверсий приведены в табл. 3.

Как видно из таблицы, температура на нижней границе инверсии всегда была ниже 0 °С, среднее значение глубины инверсии $z_t - z_b$ составляло 571 м, а ее мощность $T_t - T_b$ — 3,8 °С. При этом следует отметить, что высота верхней границы инверсии, равно как и ее температура, могли быть занижены вследствие ограничения диапазона высот, регистрируемых профилемером (не более 1000 м.).

На рис. 5 приведены гистограммы распределения по величине основных характеристик инверсий. Как видно из рис. 5а, 13 % инверсий начинались от подстилающей поверхности, а более 32 % — имели основание ниже 100 м. Эти значения примерно в два раза меньше, чем приведенные в работах [13, 14], основанных на данных аэрологических наблюдений полярных станций в Арктике в зимний период, и в работе [15] — на данных аэростатных зондирований в море Уэдделла в период антарктической зимы. Указанное расхождение, вероятно, обусловлено временем наблюдений: весенний и зимний периоды — и, соответственно, отсутствием прогрева подстилающей поверхности коротковолновой радиацией в периоды измерений, данные которых использованы в упомянутых выше работах.

Рис. 5б показывает, что инверсии в период наблюдений были довольно тонкими. Их глубина в большинстве случаев была менее 700 м, что неплохо согласуется с данными работы [15]: 550 м. Изменение температуры в инверсионном слое, как видно из рис. 5г, может быть довольно большим, вплоть до 12 °С. Однако в основ-

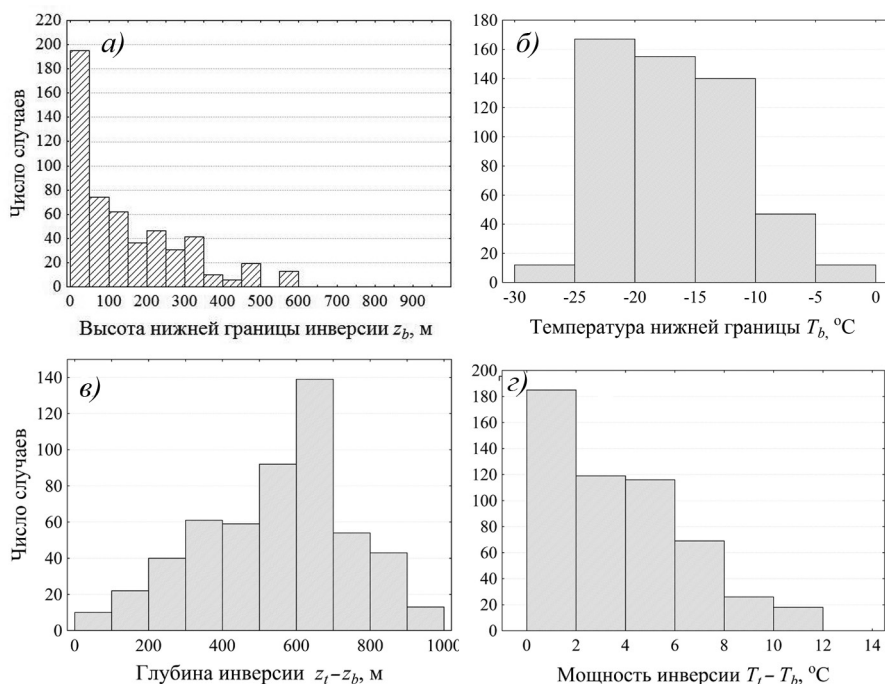


Рис. 5. Гистограммы повторяемости характеристик инверсий, зарегистрированных в апреле 2019 г. в районе дрейфа НЭС «Академик Трёшников».

a — высота нижней границы инверсии z_b ; *б* — температура воздуха на нижней границе инверсии T_b ; *в* — глубина инверсии $z_t - z_b$; *г* — мощность инверсии $T_t - T_b$

Fig. 5. Histograms of inversion statistics as observed in April 2019 during drift of RV “Akademik Tryoshnikov”.

a — height of inversion lower boundary z_b ; *б* — air temperature at the lower boundary of inversion T_b ; *в* — depth of inversion $z_t - z_b$; *г* — intensity of inversion $T_t - T_b$

ном мощность инверсий варьировала в пределах от 1 до 8 °C, что соответствует величине, приведенной в работе [14], основанной на данных радиозондирований российских береговых и островных станций: от 2 до 6 °C.

Таким образом, можно сделать вывод, что, несмотря на различия в технологии зондирования, места и времени его проведения, статистика инверсий, полученных в экспедиции «Трансарктика-2019», не сильно отличается от аналогичной статистики инверсий, наблюдаемых на арктическом побережье и над ледяным покровом моря Уэдделла в зимний сезон. Полученные с помощью температурного профилера МТР-5РЕ данные о температурном режиме АПС высокого пространственно-временного разрешения в районе существенной циклонической активности в известной степени подтверждают высказанное в работе [15] предположение о том, что атмосферный пограничный слой над арктическим и антарктическим морским ледяным покровом имеет тенденцию к локальному формированию в холодный период года, поскольку масштаб времени его приспособления к изменению внешних условий меньше, чем масштаб времени адвективных событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получен опыт использования комплекса аппаратуры дистанционного зондирования нижнего слоя атмосферы в условиях Арктики и выполнена валидация результатов измерений радиометрических систем по данным аэрологических зондирований в широком спектре метеорологических условий.

По результатам сравнения данных радиометра водяного пара РВП с данными аэрологических зондирований показано, что расхождение между ними в среднем не превышает 6 % при среднеквадратическом отклонении $0,54 \text{ кг/м}^2$ и значимом коэффициенте корреляции 0,92. При этом выявлено, что по данным РВП наблюдается незначительное, но систематическое занижение величины интегрального влагосодержания атмосферы. Особенно заметно расхождение при малых значениях влагосодержания. Впрочем, в этом случае и точность оценки по аэрологическим данным остается под вопросом.

Анализ данных МТР-5РЕ показал, что в целом они адекватно воспроизводят профиль температуры воздуха в нижнем километровом слое атмосферы. Небольшие отклонения от профилей температуры, построенных по аэрологическим данным, имеют место лишь при больших ее градиентах. Этот недостаток полностью окупается предоставляемой комплексом возможностью подробно и с малой дискретностью исследовать динамику формирования приповерхностных инверсий.

Оценивая работу обоих комплексов в целом, следует отметить, что они позволяют при минимальных затратах на эксплуатацию получать с высоким пространственным и, особенно, временным разрешением информацию о характеристиках нижних слоев атмосферы, недоступную при использовании других средств наблюдений.

Предварительный анализ полученных данных РВП показал, что среднемесячное значение интегрального содержания атмосферы в районе дрейфа экспедиции «Трансарктика-2019» в апреле практически совпадает с рассчитанным для того же месяца по данным аэрологических зондирований, выполненных в 1983 — 1988 гг. на ближайшей к району работ полярной станции Баренцбург ($3,61$ и $3,62 \text{ кг/м}^2$). При этом интегральное влагосодержание атмосферы в районе работ экспедиции изменялось в широких пределах, от 2 до 10 кг/м^2 , с экстремальными значениями, зарегистрированными в период с 15 по 20 апреля и обусловленными интенсивным переносом воздушных масс атлантического происхождения.

На основе анализа данных МТР-5РЕ сделан вывод, что, несмотря на различия в технологии зондирования, места и времени его проведения, статистика инверсий, полученных в экспедиции «Трансарктика-2019», соответствует аналогичной статистике инверсий, наблюдаемых на арктическом побережье и над ледяным покровом моря Уэдделла в зимний сезон. Полученные данные о температурном режиме АПС высокого пространственно-временного разрешения в районе существенной циклонической активности в известной степени подтвердили высказанное в работе [15] предположение о том, что пограничный слой атмосферы над арктическим и антарктическим морским ледяным покровом имеет тенденцию к локальному формированию в холодный период года, поскольку масштаб времени его приспособления к изменению внешних условий меньше, чем масштаб времени адвективных событий.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект RFMEFI61619X0108).

Благодарности. Авторы благодарны участникам экспедиции «Трансарктика-2019» за помощь при проведении наблюдений и анонимным рецензентам за сделанные замечания и комментарии.

Competing interests. There are no competing interests.

Funding. This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science (project RFMEFI61619X0108).

Acknowledgements. The authors are grateful to the participants of the expedition “Transarktika-2019” for assistance in execution of observations and anonymous reviewers for comments.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. doi:10.1017/CBO9781107415324.
2. Uttal T., Starkweather S., Drummond J.R., Vihma T., Makshtas A.P., Darby L.S., Burkhart J.F., Christopher J. Cox Ch., Schmeisser L.N., Haiden T., Maturilli M., Shupe M. D., De Boer G., Auromet S., Grachev A.A., Crepinsek S.M., Bruhwiler L., Goodison B, Bruce McArthur, Walden Von P., Dlugokencky E.J., Persson P. Ola G., Lesins G., Laurila T. Ogren J.A., Stone R., Long Ch.N., Sharma S., Massling A., Turner D.D., Stanitski D.M., Asmi Ei., Aurela M., Skov H., Eleftheriadis K., Virkkula A., Platt A., Førland E.J., Iijima Y., Ingeborg E. Nielsen, Bergin M.H., Candlish L., Zimov N.S., Zimov S.A., O'Neill N.T., Fogal P.F., Kivi R., Konopleva-Akish E.A., Verlinde J., Kustov V.Y., Vassel B., Ivakhov V.M., Viisanen Y., Intrieri J.M. International Arctic Systems for Observing the Atmosphere // An International Polar Year Legacy Consortium. Bulletin of the American Meteorological Society. 2016. V. 97. № 6. P. 1033 — 1056.
3. Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyskov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65 (3). P. 255 — 274.
4. Ильин Г.Н., Троцкий А.В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2017. Т. 60. № 4. С. 326 — 335.
5. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радионизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
6. Troitsky A.V., Gaykovich K.P., Kadygrov E.N., Kosov A.S., Gromov V.A. Thermal sounding of the atmosphere boundary layer in oxygen absorption band center // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31. № 1. P. 116 — 120.
7. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Leuvskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // Journal of Atmospheric, and Oceanic Technology. 1999. V. 16. P. 805 — 818.
8. Folomeev V.V., Kadygrov E.N., Miller E.A., Nekrasov V.V., Shaposhnikov A.N., Troitsky A.V. Advanced Microwave System for Measurement of ABL Thermal Stratification in Polar Region // Proceedings of WMO Techn. Conference on Meteorological Instruments and Methods of Observations. Helsinki, 2010. P. 1 — 6.

9. EPA. Quality Assurance Guidance for the Collection of Meteorological Data Using Passive Radiometers. U.S. Environmental Protection Agency Region 10 Office of Environmental Assessment and U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards. FINAL 0611, 2011. 215 p.
10. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Радиотеплолокационные методы определения характеристик влагосодержания облачной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 280 с.
11. Бурова Л.П. Влагооборот в атмосфере Арктики. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 128 с.
12. Бурова Л.П., Лукьянчикова Н.И. Распределение водяного пара в атмосфере Арктики в условиях ясного и пасмурного неба // Метеорология и гидрология. 1996. № 1. С. 35 — 42.
13. Kahl J.D. Characteristics of the Low-Level Temperature Inversion along the Alaskan Arctic Coast // Int. J. Climatol. 1990. V. 10. P. 537 — 548.
14. Serreze M.C., Kahl J.D., Schnell, R.C. Low-Level Temperature Inversions of the Eurasian Arctic and Comparisons with Soviet Drifting Station Data // J. Climate. 1992. V. 5. P. 615 — 629.
15. Andreas E.L., Claffey K.J., Makshtas A.P. Low-level atmospheric jets and inversions over the Western Weddell sea // Boundary-Layer Meteorology. 2000. V. 97. P. 459 — 486.

REFERENCES

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
2. Uttal T., Starkweather S., Drummond J.R., Vihma T., Makshtas A.P., Darby L.S., Burkhart J.F., Christopher J. Cox Ch., Schmeisser L.N., Haiden T., Maturilli M., Shupe M. D., De Boer G., Auromeet S., Grachev A.A., Crepinsek S.M., Bruhwiler L., Goodison B., Bruce McArthur, Walden Von P., Dlugokencky E.J., Persson P. Ola G., Lesins G., Laurila T. Ogren J.A., Stone R., Long Ch.N., Sharma S., Massling A., Turner D.D., Stanitski D.M., Asmi E., Aurela M., Skov H., Eleftheriadis K., Virkkula A., Platt A., Førland E.J., Iijima Y., Ingeborg E. Nielsen, Bergin M.H., Candlish L., Zimov N.S., Zimov S.A., O'Neill N.T., Fogal P.F., Kivi R., Konopleva-Akish E.A., Verlinde J., Kustov V.Y., Vassel B., Ivakhov V.M., Viisanen Y., Intrieri J.M. I International Arctic Systems for Observing the Atmosphere. An International Polar Year Legacy Consortium. Bulletin of the American Meteorological Society. 2016, 97 (6): 1033 — 1056.
3. Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (3): 255 — 274.
4. Il'in G.N., Troitskii A.V. Determination the tropospheric delay of radio signal by the radiometric method. *Radiofizika i kvantovaya elektronika*. Radiophysics and Quantum Electronics. 2017, 60 (4): 326 — 335. [In Russian].
5. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T. *Radioizluchenie Zemli kak planet*. Radio emission of the earth as a planet. Moscow: Nauka, 1974: 188 p. [In Russian].
6. Troitsky A.V., Gaykovich K.P., Kadygrov E.N., Kosov A.S., Gromov V.A. Thermal sounding of the atmosphere boundary layer in oxygen absorption band center. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 1993, 31 (1): 116 — 120. [In Russian].
7. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Leuvskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison of experiments. *Journal of Atmospheric, and Oceanic Technology*. 1999, 16: 805 — 818.

8. Folomeev V.V., Kadygrov E.N., Miller E.A., et al. Advanced Microwave System for Measurement of ABL Thermal Stratification in Polar Region. Proceedings of WMO Techn. Conference on Meteorological Instruments and Methods of Observations. Helsinki, Finland, 2010: 1 — 6.
9. EPA. Quality Assurance Guidance for the Collection of Meteorological Data Using Passive Radiometers. U. S. Environmental Protection Agency Region 10 Office of Environmental Assessment and U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards. FINAL 0611, 2011: 215 p.
10. Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Iu. Radioteplolokatsiia v meteorologii. Radioteplolokatsionnye metody opredeleniia kharakteristik vlagosoderzhaniia oblachnoi atmosfery. Radio-infrared detection in meteorology. Radio-infrared detection methods for determining moisture content of cloud atmosphere. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 280 p. [In Russian].
11. Burova L.P. Vлагооборот v atmosfere Arktiki. Moisture in the Arctic atmosphere. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983: 128 p. [In Russian].
12. Burova L.P., Luk'ianchikova N.I. Water vapor distribution in the Arctic atmosphere in clear and overcast conditions. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1996, 1: 35 — 42. [In Russian].
13. Kahl J.D. Characteristics of the low-level temperature inversion along the Alaskan Arctic Coast. *Int. J. Climatol.* 1990, 10: 537 — 548.
14. Serreze M.C., Kahl J.D., Schnell R.C. Low-level temperature inversions of the Eurasian Arctic and comparisons with Soviet drifting station data. *J. Climate*. 1992, 5: 615 — 629.
15. Andreas E.L., Claffey K.J., A.P. Makshtas A.P. Low-level atmospheric jets and inversions over the Western Weddell sea. *Boundary-Layer Meteorology*. 2000, 97: 459 — 486.