

Первый в мире эксперимент по микроволновому зондированию Земли из космоса на спутнике «Космос-243»

Б. Г. Кутуза¹, Л. М. Митник², А. Б. Аквилонова³

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
Москва, 125009, Россия
E-mail: kutuza@cplire.ru*

² *Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru*

³ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: anna@ire.rssi.ru*

23 сентября 2018 г. исполнилось 50 лет с момента запуска на орбиту спутника «Космос-243»* с четырьмя радиометрами сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, которые измеряли тепловое излучение атмосферы и поверхности Земли на длинах волн 0,8; 1,35; 3,4 и 8,5 см. Изложена история исследований по разработке СВЧ-радиометрических методов дистанционного зондирования природной среды и созданию передовой для того времени аппаратуры. Рассмотрены характеристики радиометров, основные результаты эксперимента и возможности совместного анализа СВЧ-измерений со спутниковыми данными в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн. Впервые были одновременно восстановлены полное содержание воды в облаках W , водяного пара в атмосфере Q , температура поверхности океана, выявлены области осадков и штормовых ветров. По спутниковым данным построены поля водяного пара, получены зависимости W и Q от широты для отдельных океанов и всего Мирового океана, оценена масса водяного пара и воды в облаках в атмосфере Земли; определены приращения яркостной температуры в атмосферных фронтах, в зонах осадков, во внутритропической зоне конвергенции. Определены положение кромки и сплочённость морских льдов вокруг Антарктиды, объяснены особенности СВЧ-излучения материковых льдов. Для земных покровов показано влияние влажности и структуры верхнего слоя поверхности и рельефа на яркостную температуру. Отмечено, что новое направление дистанционного зондирования Земли из космоса, начало которому было положено первым в мире экспериментом на спутнике «Космос-243», интенсивно развивается в настоящее время.

Ключевые слова: СВЧ-зондирование Земли, «Космос-243», восстановление геофизических параметров

Одобрена к печати: 18.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-9-30

Введение

Арсенал средств, используемых для изучения нашей планеты из космоса, существенно расширился после 23 сентября 1968 г., когда на орбиту был выведен спутник «Космос-243» с четырьмя трассовыми СВЧ-радиометрами (сверхвысокочастотными), ориентированными в надир. СВЧ-измерения продолжались до 2 октября, что позволило охватить почти весь земной шар, за исключением полярных областей к северу и югу от 71°.

Успех спутникового эксперимента явился результатом экспериментальных и теоретических работ, выполнявшихся в различных научных коллективах СССР. В конце 1950-х – начале 1960-х гг. одним из важнейших научных направлений была радиоастрономия, бурное

* См. презентацию пленарного доклада авторов на сайте 16-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/pdf/16/6903_Кутуза_Митник_Аквилонова_Космос-243_ИКИ_12_ноября_2018.pdf.

развитие которой привело к ряду выдающихся открытий. В 1965 г. было измерено реликтовое космическое излучение на длине волны $\lambda = 7,3$ см с использованием рупорно-параболической антенны с очень низким уровнем боковых лепестков и чувствительного радиометра. Сложность задачи заключалась в том, что реликтовое излучение изотропно, а температура его меньше 3 К. В 1967 г. по измерениям на радиотелескопе были открыты радиопульсары. Энтони Хьюишу (Antony Hewish) в 1974 г., Арно Аллану Пензиасу (Arno Allan Penzias) и Роберту Вудро Уилсону (Robert Woodrow Wilson) в 1978 г. были присуждены Нобелевские премии по физике. В 1965 г. радиоастрономические наблюдения зон звёздообразования на частотах молекулы гидроксила в области 1610–1670 МГц привели к открытию космических мазеров. В 1969 г. мощные мазеры были обнаружены на частоте водяного пара $\nu = 22,235$ ГГц. При таких измерениях требовался учёт поглощения в атмосфере и её собственного излучения, зависящего от частоты, характеристик атмосферы и угла места.

Собственное излучение атмосферы в связи с радиоастрономическими задачами изучалось в Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) (Жевакин, Наумов, 1967) и Физическом институте им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР (ФИАН) (Соломонович, Атаев, 1960). Но решение задач геофизики, метеорологии и окружающей среды по излучению системы «атмосфера – подстилающая поверхность» не рассматривалось.

В начале 1960-х гг. под руководством А. Е. Башаринова в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР (ныне Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН)) и А. С. Гурвича в Институте физики атмосферы Академии наук СССР (ныне ИФА РАН) были развёрнуты исследования радиотеплового излучения атмосферы, морской поверхности, ледяного покрова и других природных объектов, поддержанные директорами институтов академиками В. А. Котельниковым и А. М. Обуховым.

В 1963 г. А. Е. Башаринов, С. Т. Егоров, М. А. Колосов и Б. Г. Кутуза получили авторское свидетельство на СВЧ-радиометрический способ определения геофизических параметров с летательных аппаратов. Было показано, что измерения с самолёта или со спутника радиоизлучения Земли в нескольких участках спектра или на разных поляризациях позволяют раздельно определять параметры атмосферы и поверхности (Башаринов, Кутуза, 1968; Башаринов и др., 1963, 1968). Создавалась и экспериментальная база: в Специальном конструкторском бюро ИРЭ (СКБ ИРЭ) были изготовлены СВЧ-радиометры сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн с рекордной для того времени чувствительностью.

В 1964 г. в Московском научно-исследовательском институте приборостроения (МНИИП) (сейчас Концерн радиостроения «Вега») был изготовлен радиометр на длину волны $\lambda = 8,5$ см, а также выполнены эксперименты над Каспийским морем по обнаружению границ льда сквозь сплошную облачность (Гурвич, Егоров, 1966) и определению температуры поверхности моря (Матвеев, 1968). Радиометр был установлен под корпусом самолёта Ил-12 в радиопрозрачном контейнере. Неподвижная параболическая антенна была ориентирована в надир. Для оценки содержания водяного пара по измерениям на $\lambda = 1,35$ над водой были определены вариации яркостных температур (Гурвич, Тиме, 1966).

Параллельно с работами ИРЭ и ИФА в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) были выполнены теоретические исследования по переносу СВЧ-излучения в атмосфере, создана летающая лаборатория и проведены первые самолётные измерения излучения облачной атмосферы и поверхности в широком диапазоне длин волн (Рабинович, Шукин, 1968; Шифрин и др., 1968). Большой объём данных по СВЧ-зондированию поверхности был получен в Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского (Тучков и др., 1968), а в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) — по изучению радиофизических свойств льда. Исследования СВЧ-излучения атмосферы и земных покровов проводились также в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) (Горелик и др., 1972) и Московском институте гражданской авиации.

Эксперимент со спутника «Космос-243»

При подготовке спутникового эксперимента по СВЧ-зондированию Земли образовался сильный слаженный коллектив сотрудников ИРЭ РАН, ИФА РАН и МНИИП во главе с А. Е. Башариновым, А. С. Гурвичем и С. Т. Егоровым.

СВЧ-радиометры были изготовлены для установки на конкретном спутнике. Герметизированный контейнер для исследований в космосе на протяжении 7–10 сут был спроектирован в Куйбышевском филиале Центрального конструкторского бюро экспериментального машиностроения (сейчас АО РКЦ «Прогресс»). Радиометры были помещены внутри контейнера, а антенны — на его стенках снаружи. Фотографии приборного контейнера и высокочастотных головок, параметры радиометров и антенн приведены в работах (Гурвич, Кутуза, 2010; Кутуза и др., 2015) и в *таблице*. Контейнер был предоставлен со следующими условиями: эксперимент должен быть несекретным, а его результаты опубликованы в открытой печати.

Характеристики СВЧ-радиометров на спутнике «Космос-243»

Центральная частота, ГГц	3,5	8,8	22,2	37,5
Длина волны, см	8,5	3,4	1,35	0,8
Чувствительность, К	0,7	0,5	0,9	1,3
Ширина диаграммы направленности антенны, град	8,6	4,0	3,6	4,0
Эффективность, %	80	85	76	95
Разрешение на местности в апогее, км	50×50	22×22	20×20	22×22
Разрешение на местности в перигее, км	35×35	15×15	13×13	15×15

Для оперативной оценки информации, сбрасываемой со спутника по радиолинии и записываемой на ленте, участники эксперимента Б. Г. Кутуза и Д. Т. Матвеев отправились на полигон вблизи оз. Балхаш, а А. М. Шутко — в Томскую обл. А. С. Гурвич немного ранее улетел на космодром для проведения последних предполётных проверок аппаратуры. А. Е. Башаринов находился в центре управления под Москвой.

Спутник серии «Космос» с порядковым номером 243 был запущен 23 сентября 1968 г. на орбиту с наклоном 71,3°. Кроме четырёхканального радиотелескопа на спутнике был установлен узкополосный приёмник инфракрасного (ИК) излучения. Измерения продолжались 7 сут. Статья «Радиотелескопы смотрят на Землю» за подписями А. Обухова, Д. Ильичева (псевдоним Дмитрия Ильича Козлова, генерального конструктора, создателя и руководителя АО РКЦ «Прогресс»), А. Башаринова, А. Гурвича и С. Егорова была напечатана в газете «Правда» 21 января 1969 г. (Обухов и др., 1969), и тем самым были выполнены условия предоставления контейнера. Александру Михайловичу Обухову, самому старшему из руководителей и исполнителей космического эксперимента, только что исполнилось 50 лет, а самому молодому было меньше 40.

Физические основы микроволнового (МВ) зондирования и научные результаты первых спутниковых наблюдений обобщены в монографии «Радиоизлучение Земли как планеты» (Башаринов и др., 1974). Ниже приведены примеры измерений яркостных температур над океаном, материковыми и ледовыми покровами, восстановленные по ним геофизические параметры, показана эффективность совместного анализа СВЧ-данных со спутниковыми измерениями в других диапазонах длин волн. Часть материалов публикуется впервые.

Отметим, что в данной статье упомянуты только самые первые публикации, связанные с запуском искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Космос-243». Все ключевые результаты были в дальнейшем опубликованы в ведущих российских и зарубежных изданиях. Ссылки на них приведены в работах (Башаринов и др., 1974; Горбунов, Кутуза, 2018; Гурвич, Кутуза, 2010; Кутуза и др., 2015).

Результаты

Регистрация сигналов, калибровка, профили яркостной температуры

Бортовые СВЧ-радиометры измеряли вариации уходящего излучения Земли на длинах волн $\lambda = 0,8; 1,35; 3,4$ и $8,5$ см (на частотах $\nu = 37,3; 22,23; 8,8$ и $3,53$ ГГц). Для учёта изменения усиления радиометров в полёте на вход каждые 4 мин подавалось излучение «горячего» чёрного тела из контейнера, а затем «холодное» космическое излучение, принимавшееся небольшими рупорными антеннами, направленными в зенит (Башаринов и др., 1974; Гурвич, Кутуза, 2010; Кутуза и др., 2015). Результаты измерений поступали в запоминающее устройство и при пролёте спутника над территорией СССР передавались на Землю по радиотелеметрической линии. На приёмных пунктах сигналы регистрировались на электрохимической бумаге в виде последовательности точек.

Преобразование сигналов (отсчётов) в яркостные температуры $T_{\text{я}}(\lambda)$ выполнялось по расчётным значениям $T_{\text{я}}(\lambda)$ над однородными «горячими» (лес, пустыни) и «холодными» (спокойный океан при слабом ветре и отсутствии облаков) поверхностями с известной (заданной) температурой (внешняя калибровка). Коэффициенты излучения $\kappa(\lambda)$ леса были взяты равными $0,93-0,96$, а для океана находились по значениям диэлектрической проницаемости воды и среднемесячным значениям температуры и солёности. Примеры подобных расчётов приведены в работах (Башаринов и др., 1974; Кутуза и др., 2015; Митник, 1969; Шутко, 1986).

Профили яркостной температуры $T_{\text{я}}(\lambda)$ над Тихим океаном показаны на *рис. 1* (Обухов и др., 1971). Промежутки на профилях отмечают интервалы калибровки.

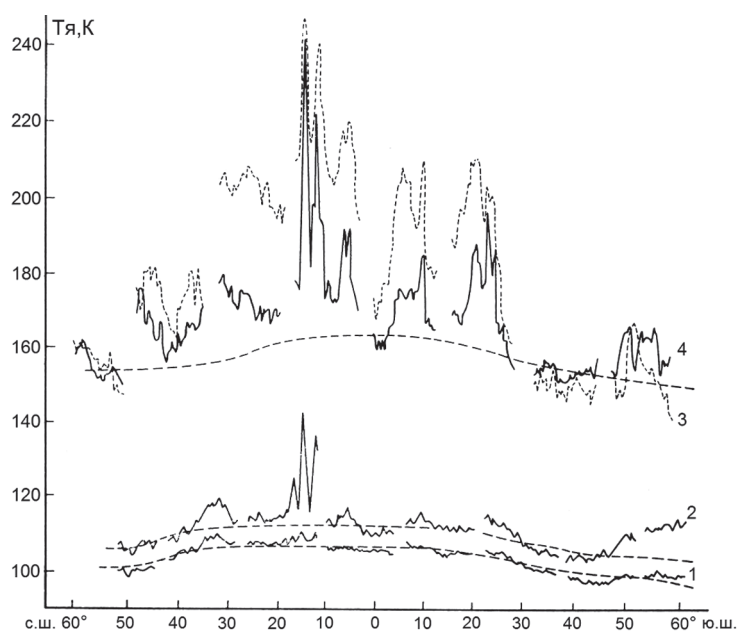


Рис. 1. Профили яркостной температуры над Тихим океаном на длинах волн: 1 — $8,5$ см; 2 — $3,4$; 3 — $1,35$ и 4 — $0,8$ см по измерениям 23 сентября 1968 г. Штриховые линии — яркостная температура на длинах волн $8,5$; $3,4$ и $0,8$ см, рассчитанные по среднеклиматическим значениям температуры поверхности воды при отсутствии облаков

Изменчивость $T_{\text{я}}(\lambda)$ ярко выражена на коротких волнах, поглощение на которых определяется вариациями интенсивности осадков и содержанием капельной воды в облаках и водяного пара в атмосфере. О сильных осадках свидетельствуют значительные приращения $T_{\text{я}}(3,4)$ между 10 и 20° с. ш. Вариации $T_{\text{я}}(8,5)$ отражают в основном изменения температуры поверхности воды. Заметный рост яркостных температур на длинах волн $3,4$ и $8,5$ см между 30 и 40° с. ш. и 45 и 60° ю. ш. при сравнительно малом уярчении $T_{\text{я}}(0,8)$ вызван увеличением излучения поверхности океана под действием ветра.

Атмосфера

Для определения паросодержания атмосферы Q и водозапаса облаков W использовалась яркостная температура на длинах волн 1,35 и 0,8 см. Физические основы алгоритмов восстановления интегральных параметров атмосферы изложены в работах (Башаринов и др., 1963, 1968). Различные варианты алгоритмов и их реализации, учитывающие параметры радиометров, приведены в исследованиях (Башаринов и др., 1969; Гурвич, Дёмин, 1970; Митник, 1969; Рабинович, Шукин, 1968). На *рис. 2* показаны профили $T_{\text{я}}(1,35)$ и $T_{\text{я}}(0,8)$ над Тихим океаном от Антарктиды (65° ю. ш., 180° з. д.) до Северной Америки (32° с. ш., 123° з. д.) и профили Q и W , определённые по алгоритму (Митник, 1969). Цифрой 3 обозначен профиль температуры поверхности океана (ТПО) в сентябре по данным атласа (Тихий океан, 1968). Значения ТПО использованы при расчёте коэффициента излучения океана.

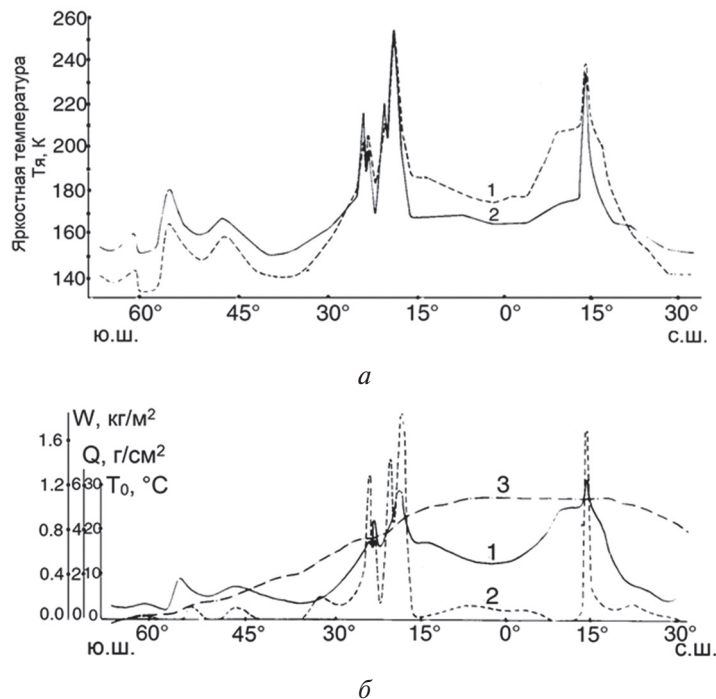


Рис. 2. Профили: *а* — яркостной температуры на длинах волн 1,35 см (1) и 0,8 см (2); *б* — паросодержания атмосферы (1) и водозапаса облаков (2) по измерениям над Тихим океаном 23 сентября 1968 г. (8–9-й витки). Пунктирная линия 3 на *рис. 2б* — температура поверхности воды вдоль подспутниковой траектории по климатическим данным

В высоких южных широтах $T_{\text{я}}(1,35) = 140\text{--}145$ К при паросодержании $0,3\text{--}0,8$ г/см². В низких широтах $T_{\text{я}}(1,35)$ растёт до $210\text{--}220$ К из-за увеличения Q до $5\text{--}6$ г/см². На $\lambda = 0,8$ см переход от полярных широт к тропическим выражен меньше: значения $T_{\text{я}}(0,8)$ увеличиваются от ~ 150 до ~ 180 К. Максимальные значения $T_{\text{я}}(1,35)$ и $T_{\text{я}}(0,8)$ отмечаются между 15 и 25° с. ш. и в окрестности 15° ю. ш. Узкие пики на профилях радиояркостности соответствуют зонам выпадения сильных осадков. Ширина зон с повышенным содержанием Q , как правило, больше, чем зон с заметным водозапасом облаков.

Для сопоставления спутниковых оценок Q с радиозондовыми (р/з) значениями было использовано 38 р/з на расстоянии <150 км от подспутниковой точки с разницей во времени ≤ 3 ч от момента пролёта. Среднеквадратичное отклонение спутниковых определений Q от радиозондовых не превышало $0,2$ г/см² и находится в хорошем согласии с расчётной точностью (Гурвич, Тиме, 1966). Погрешности оценок Q и W по $T_{\text{я}}(1,35)$ и $T_{\text{я}}(0,8)$, обусловленные ошибками алгоритма, радиационной модели, ТПО и влиянием волнения на коэффициент излучения морской поверхности, рассмотрены в работах (Митник, 1969; Митник, Шутко,

1970). Отмечено, что для уменьшения ошибок определения Q и W следует использовать T_y в сантиметровом диапазоне длин волн.

На *рис. 3* приведены профили W , Q и T_0 над Атлантическим океаном и Норвежским морем от Южной Америки (12° с. ш., 65° з. д.) до Скандинавского п-ва (71° с. ш., 25° в. д.). На графиках хорошо видна связь Q с ТПО. Например, над холодным Лабрадорским течением (38° с. ш.) спад значений Q обусловлен уменьшением ТПО на $10\text{--}12^\circ\text{C}$. В тропической зоне пониженные значения паросодержания могут быть вызваны другими причинами. Так, в районе Виргинских островов ($16\text{--}18^\circ$ с. ш.) значения Q падают ниже 3 г/см^2 .

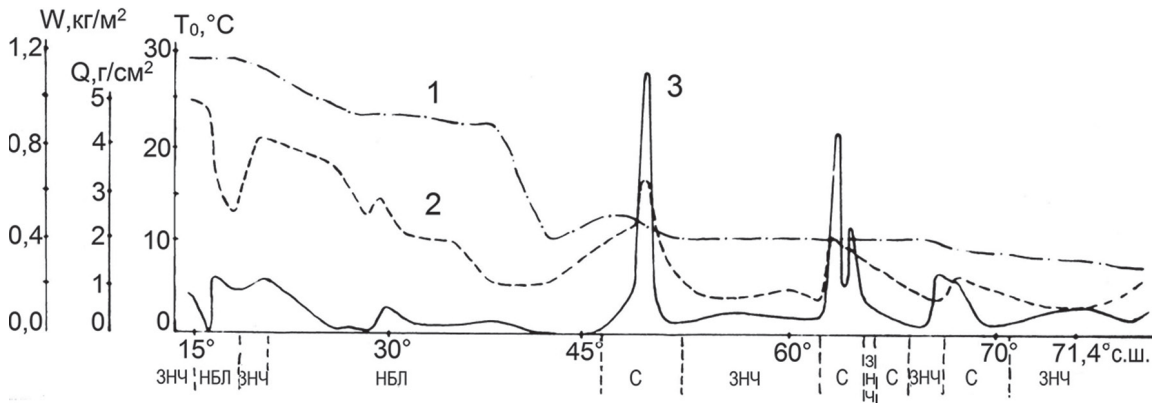


Рис. 3. Профили температуры поверхности океана (1), паросодержания атмосферы (2) и водозапаса облаков (3) вдоль проекции орбиты спутника «Космос-243» над Атлантическим океаном 23 сентября 1968 г. (6-й виток)

На профилях Q и W , как правило, отчётливо выделяются районы со значительной и сплошной облачностью. На *рис. 3* показаны границы зон со сплошной (С), значительной (ЗНЧ) и небольшой (НБЛ) облачностью по данным метеорологических спутников «ЭССА-6/7». Подъём значений Q и рост W до 1 кг/м^2 в районе $45\text{--}48^\circ$ с. ш. наблюдается при пересечении фронтальной облачности. Такая же картина отмечается и вблизи $62\text{--}65^\circ$ с. ш.

Для прогноза погоды и обеспечения морской деятельности необходимы данные о скорости ветра V и осадках над районами океана с редкой сетью контактных измерений. Из анализа измерений спутника «Космос-243», карт нефанализа и результатов моделирования следует, что источником таких данных могут стать спутниковые СВЧ-радиометры. При пересечении мощной облачности атмосферных фронтов, внетропических и тропических циклонов, внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) яркостная температура на длинах волн $1,35$ и $0,8$ см превышает 180 К , а значения водозапаса $W \geq 0,5\text{ кг/м}^2$. На картах нефанализа в этих районах обычно была указана сплошная кучево-дождевая облачность.

По данным спутника «Космос-243» за $23\text{--}27$ сентября 1968 г. было исследовано более 30 случаев, когда на профилях Q и W отчётливо выявлялась ВЗК (Алексеева, Митник, 1970). На *рис. 4* (см. с. 15) показаны профили Q и W при пересечении ВЗК над Тихим и Атлантическим океанами и близкие по времени карты нефанализа. Пики на профилях водозапаса облаков обусловлены осадками, интенсивность которых в тропиках велика. Погрешность оценки Q и W в зонах с осадками при использовании алгоритма (Митник, 1969) возрастает. Высокие значения T_y (см. *рис. 1* и *2а*) свидетельствуют о сильных осадках. Оценка их интенсивности I может быть выполнена по $T_y(3,4)$ и $T_y(8,5)$.

Рассеяние излучения в осадках на длинах волн $3,4$ и $8,5$ см значительно меньше, чем на $1,35$ и $0,8$ см, а поглощение в слое осадков и значения T_y слоя растут с увеличением интенсивности дождя R , как показывают результаты моделирования (Кутуза и др., 1969) и профили T_y на *рис. 1–4*. Оценки интенсивности излучения гидрометеоров позволили выявить не менее десяти градаций интенсивности в диапазоне значений водосодержания от $0,03$ до $0,3\text{ г/см}^2$ (Башаринов и др., 1969, 1970).

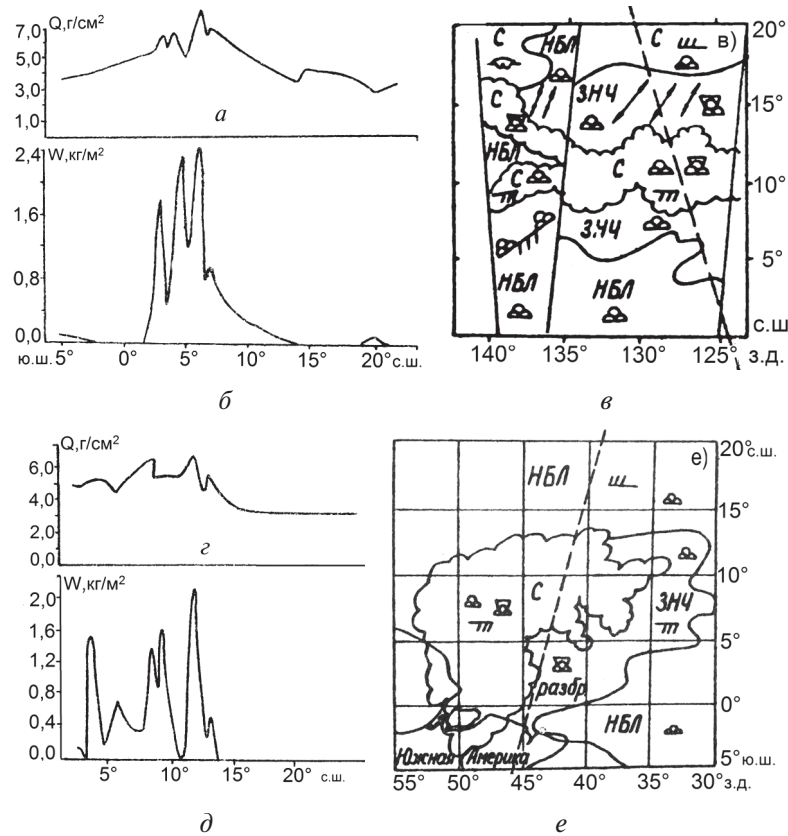


Рис. 4. Профили паросодержания атмосферы (а, д) и водозапаса облаков (б, д) по данным спутника «Космос-243»; карты нефанализа по видимым и ИК-снямкам со спутника «Космос-226» (витки 1543-й и 1551-й) над восточной частью Тихого океана (в) и по видимым снимкам со спутников ESSA-6/7 над западной частью Атлантического океана (е). С — сплошная облачность, ЗНЧ — значительная и НБЛ — небольшая. Пунктирные линии на рис. 4в, е — проекции орбиты спутника «Космос-243»

23–27 сентября орбита спутника 53 раза пересекала атмосферные фронты, отмеченные на синоптических картах (Аквилонова и др., 1971). Разница между СВЧ-измерениями и картами приземного анализа, как правило, не превышала 6 ч и только в нескольких случаях составляла 10–12 ч. Для анализа также привлекались карты нефанализа. Пересечение фронта во всех случаях сопровождалось ростом $T_{я}(0,8)$ до 170–235 К и $T_{я}(1,35)$ до 160–225 К (рис. 5, см. с. 16). Водозапас (интегральная водность) облаков превышал при этом $0,2 \text{ кг/м}^2$, и значения Q , как правило, были больше среднеширотных. В областях с повышенным паросодержанием атмосферы, где $T_{я}(0,8) > 190 \text{ К}$ и $T_{я}(1,35) > 180 \text{ К}$, формировалась мощная облачность и выпадали осадки.

Границы облачных образований с $W > 0,2 \text{ кг/м}^2$ обычно находились внутри зоны, отмеченной на картах нефанализа буквой «С» — сплошная облачность. Вблизи линии фронта среднее значение водозапаса составляло $0,7–0,8 \text{ кг/м}^2$, а максимальное — при усреднении по площади $\sim 500 \text{ км}^2$ — достигало $1,5–2,0 \text{ кг/м}^2$. Значения параметров Q и W заметно зависят от температуры поверхности океана (Башаринов, Митник, 1970).

На рис. 6а (см. с. 16) приведён снимок тайфуна Кармен и связанной с ним облачности холодного фронта в северо-западной части Тихого океана. Пунктирная линия на снимке — проекция орбиты спутника «Космос-243». В районе $45–46^\circ \text{ с. ш.}$ значения $T_{я}$ достигают 235 К на длинах волн 0,8 и 1,35 см, $\sim 120 \text{ К}$ — на волне 3,4 см и $\sim 107 \text{ К}$ — на волне 8,5 см, что, скорее всего, вызвано осадками. Контраст фронтальной полосы относительно безоблачного океана составляет $\sim 50–85 \text{ К}$ на $\lambda = 0,8 \text{ см}$, $\sim 65–85 \text{ К}$ на $\lambda = 1,35 \text{ см}$, $12–15 \text{ К}$ на $\lambda = 3,4 \text{ см}$ и $5–7 \text{ К}$ на $\lambda = 8,5 \text{ см}$. Контраст $T_{я}(1,35)$ обусловлен не только увеличением водозапаса облаков и влиянием дождя, но и ростом Q до 3 г/см^2 и выше. Область с повышенным паросодержанием примерно вдвое шире области, где $W \geq 1 \text{ кг/м}^2$ (рис. 6б, в).

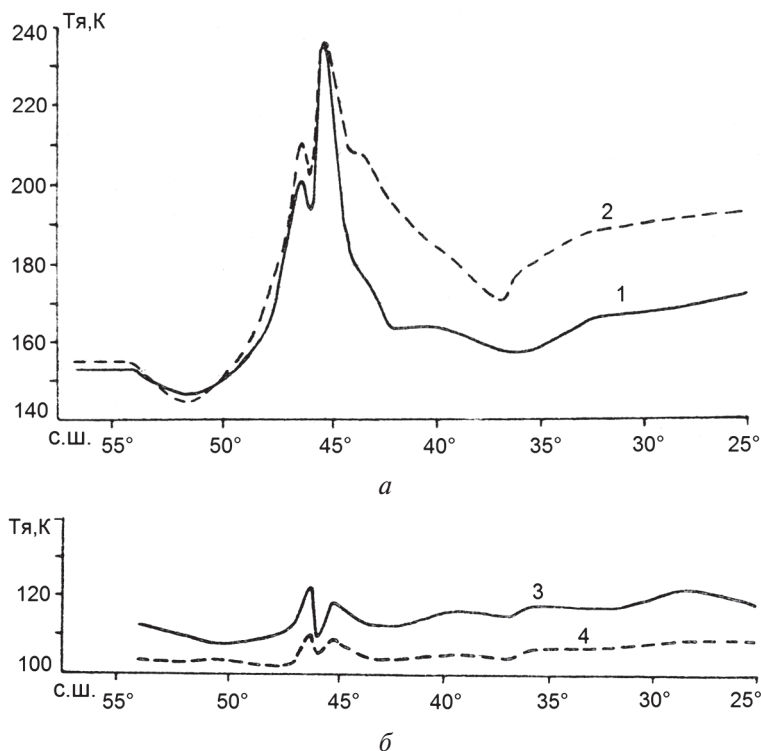


Рис. 5. Профили яркостной температуры при пересечении облачности холодного фронта в северо-западной части Тихого океана на длинах волн 0,8 см (1); 1,35 (2); 3,4 (3) и 8,5 см (4)

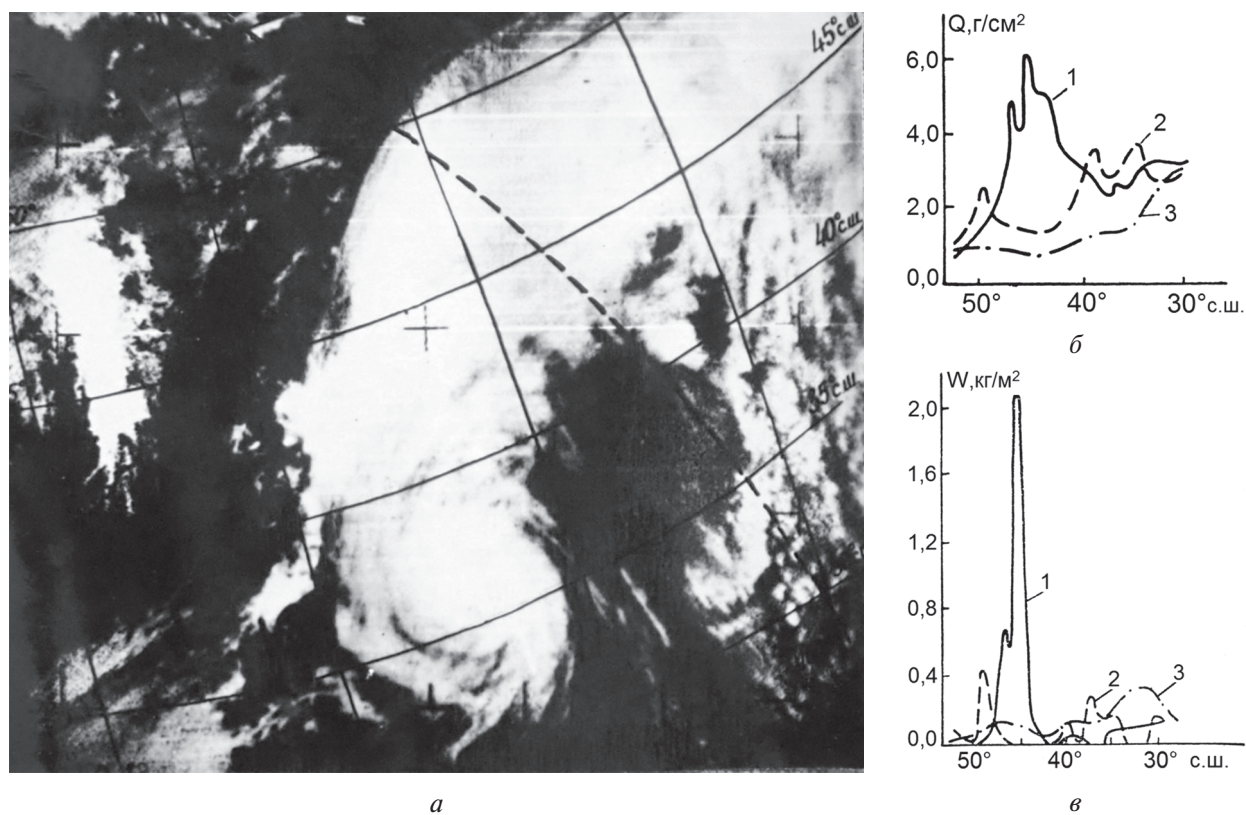


Рис. 6. Тайфун «Кармен» и холодный фронт над северо-западной частью Тихого океана на снимке со спутника ESSA-6 23 сентября (а); профили паросодержания атмосферы (б) и водозапаса облаков (в): 1 — 23 сентября, 2 — 24 сентября, 3 — 25 сентября 1968 г.

При периоде обращения спутника «Космос-243» 89,6 мин проекции витков на поверхности Земли за соседние сутки были близки, что позволило оценить междусуточную изменчивость водозапаса облаков и паросодержания атмосферы. За сутки после прохождения фронта по измерениям на 19-м витке паросодержание атмосферы в районе 45° с. ш. снизилось на 4 г/см², а облачность практически исчезла. За следующие сутки по измерениям на 35-м витке значения Q снизились ещё на 0,5 г/см².

Трассовые измерения яркостной температуры и восстановленные профили Q послужили основой для построения карт влажности над океанами и использования этих карт при анализе синоптических ситуаций (Гурвич, Демин, 1970; Домбковская, Митник, 1970; Митник, 1972; Обухов, Татарская, 1969). Пример такой карты для Индийского океана приведён на рис. 7. Построение карт Q осуществлялось по сравнительно редкой сетке данных. Шаг изолиний Q был выбран равным 0,5 г/см². Максимальное расстояние между соседними засечками на карте паросодержания атмосферы над Индийским океаном (на 19° с. ш. и 21° ю. ш.) составляло 2000 км. При отсутствии мощной облачности и осадков среднеквадратичная ошибка составила 0,2 г/см² к северу от 40° ю. ш.

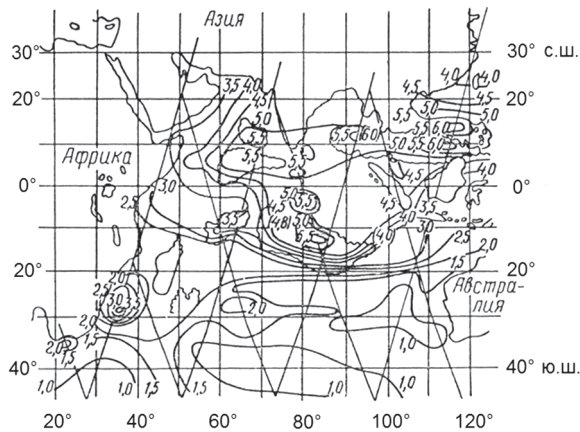


Рис. 7. Поле паросодержания атмосферы над Индийским океаном 23–24 сентября 1968 г. с границами сплошной облачности по данным нефанализа

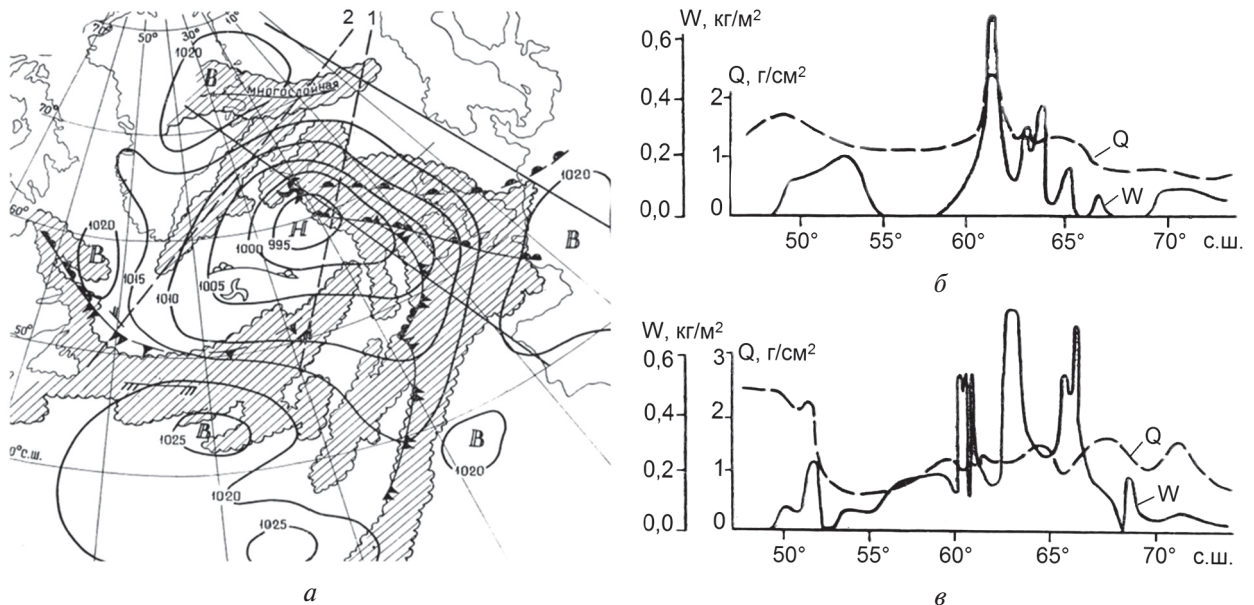


Рис. 8. Синоптическая карта за 15 ч 25 сентября 1968 г. и профили водозапаса облаков W и паросодержания атмосферы Q . Пунктирные линии 1 и 2 — проекции орбиты спутника «Космос-243»; сплошные линии — границы полосы обзора спутника «Космос-226»

Новые возможности для изучения геофизических параметров атмосферы и поверхности были открыты при совместном анализе данных спутникового СВЧ-зондирования и измерений в других участках спектра (Домбковская, Митник, 1970). На *рис. 8а* (см. с. 17) показана синоптическая ситуация над Северной Атлантикой за 15 ч 25 сентября.

На карту нанесены границы сплошной облачности по данным метеорологических спутников «Космос-226» и ESSA-6/7 и проекции двух орбит спутника «Космос-243». Разница во времени измерений не превышала 3 ч. На карте северо-западнее Британских островов располагался обширный циклон с давлением в центре менее 995 гПа. Проекция 1 проходит через центральную часть циклона, пересекает фронт окклюзии и северный тёплый фронт. На телевизионном (ТВ) снимке со спутника «Космос-226» (не показан) отчётливо было видно, что сквозь перистые облака просматривается массив слоисто-кучевообразной облачности, являющейся фронтальной. На ИК-снимке тон этого массива серый, лишь немногим светлее тона безоблачных пространств. Это означает, что излучение в диапазоне 8–12 мкм формируется в основном на верхней границе низкой слоистообразной облачности и проникает сквозь тонкие перистые облака. Значения водозапаса в этой облачной полосе варьируют от 0,05 до 0,7 кг/м² (*рис. 8б*), что характерно для слоистой и слоисто-кучевообразной облачности нижнего яруса.

На профиле водозапаса W в районе 60–65° с. ш. отмечаются три пика различной величины, которые не проявляются на ТВ- и ИК-снимках. Максимальное значение $W \approx 0,7$ кг/м², сопровождающееся ростом Q до 2 г/см², соответствует району, где на карте (см. *рис. 8а*) отмечается дождь перед фронтом окклюзии. Интенсивность дождя, по-видимому, небольшая, так как приращения $T_{я}$ на каналах 3,4 и 8,5 см отсутствуют.

Облачная полоса на северо-западе циклонической области (58–68° с.ш. на *рис. 8в*) не является фронтальной, но также характеризуется большой изменчивостью водозапаса. Профиль W — пилообразный, с максимальным значением $\sim 0,8$ кг/м².

СВЧ-радиометрические измерения позволяют оценить приток тепла E при конденсации водяного пара в облаках, что важно для исследования динамики процессов в атмосфере. Оценка E в массиве кучево-дождевых и кучево-образных облаков у северо-восточного побережья Южной Америки была выполнена в работе (Алексеева, Митник, 1970). Значения Q и W (см. *рис. 4а, б, г и д*) были получены за 2 ч до наблюдений спутников ESSA-6/7 (см. *рис. 4е*). Для сплошной облачности (С на карте нефанализа, см. *рис. 4е*) $W = 0,08$ кг/м², а $Q = 5,3$ г/см². При площади облачности $S = 1,7 \cdot 10^{16}$ см² масса облачных капель $M_w = 1,36 \cdot 10^{15}$ г, а масса водяного пара $M_Q = 9,0 \cdot 10^{16}$ г. Процент сконденсированной воды в облачности составил $\sim 1,5$ %. Полагая, что скрытая теплота испарения $L = 2,4 \cdot 10^3$ Дж/г, находим $E = 2,4 \cdot 10^3 \times 1,36 \cdot 10^{15} = 3,26 \cdot 10^{18}$ Дж.

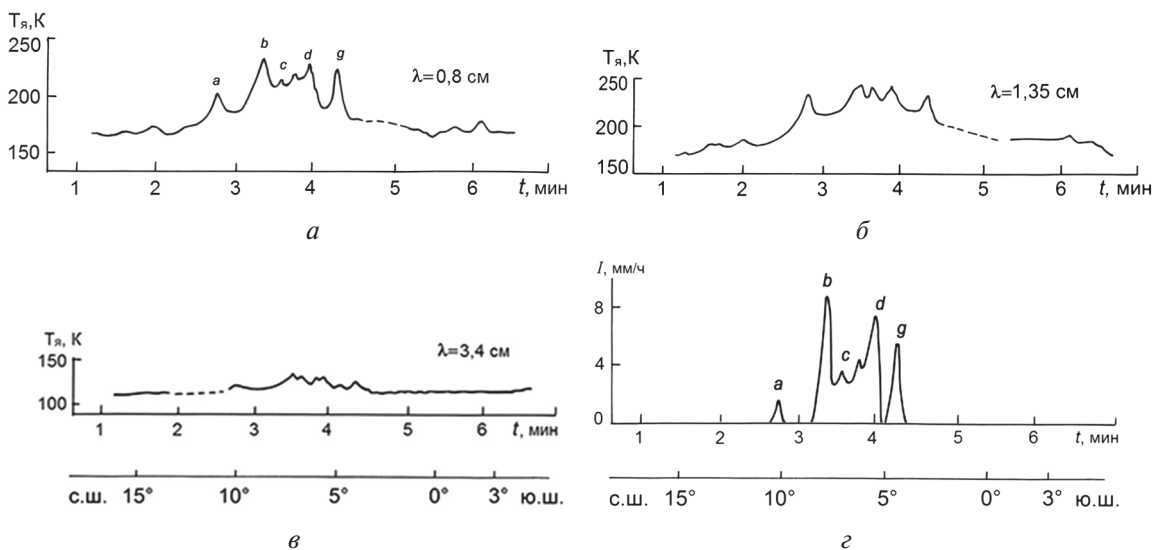


Рис. 9. Профили яркостной температуры на длинах волн 0,8; 1,35 и 3,4 см над Тихим океаном при выпадении осадков и оценка их интенсивности по приращениям $T_{я}(\lambda)$

По данным спутника «Космос-243» впервые была показана возможность обнаружения и оценки интенсивности жидких осадков I из космоса (Башаринов и др., 1969, 1974). Зоны интенсивных осадков над океаном выявлялись по высоким значениям $T_{\text{я}}(\lambda)$. На $\lambda = 0,8$ см эти значения обычно превышали 180 К. Профили яркостной температуры на длинах волн 0,8; 1,35 и 3,4 см при пересечении ВЗК над Тихим океаном приведены на *рис. 9* (см. с. 18).

Облачность в зоне конвергенции достигает больших высот и характеризуется высокими значениями водозапаса. Из облаков ВЗК выпадают обильные ливневые осадки. Признаком зон ливневых осадков на *рис. 9* является «зубчатая» структура профилей яркостной температуры, обусловленная очаговой пространственной структурой осадков. Резкие выбросы $T_{\text{я}}(\lambda)$, вызванные осадками, видны между 4 и 10° с. ш. В качестве критерия для выделения областей осадков можно взять приращение $T_{\text{я}}(0,8)$ относительно средне-климатического значения при безоблачной атмосфере и отсутствии волнения, равное 30 К. Пороговое значение $T_{\text{я}}(0,8)$ было выбрано на основе данных наземных СВЧ-радиометрических измерений излучения атмосферы (Башаринов и др., 1970, 1974).

Вклад слоистообразных облаков в яркостную температуру на волне 0,8 см в направлении зенита составляет в среднем 12–15 К. Для мощной кучевой облачности средние и максимальные значения яркостной температуры для отдельного облака могут составлять 70 и 162 К соответственно. Однако при усреднении по площади $\sim 500 \text{ км}^2$ среднее приращение $T_{\text{я}}(0,8)$ кучевой облачности не превысит порог 30 К. Оценки интенсивности дождя по приращениям $T_{\text{я}}(\lambda)$ приведены на *рис. 9г*. Использование приращений яркостной температуры на длинах волн 0,8; 1,35 и 3,4 см позволяет определить несколько градаций I при измерениях над морской поверхностью. Возможности оценки интенсивности осадков над океаном и сушей в дальнейшем существенно улучшились при использовании измерений радиометра SSM/I на длине волны 3,5 мм на спутниках DMSP Министерства обороны США (Katsaros et al., 2014).

ТПО и приводный ветер

Возможность оценки ТПО из космоса, в том числе и при облачности, следует из анализа профилей яркостной температуры $T_{\text{я}}(3,4)$ и $T_{\text{я}}(8,5)$, подспутниковых измерений температуры воды и результатов модельных расчётов (Башаринов и др., 1969, 1971б, 1974; Марцинкевич, Матвеев, 1971). Результаты моделирования $T_{\text{я}}(3,4)$ и $T_{\text{я}}(8,5)$ вдоль подспутниковых траекторий спутника «Космос-243» приведены на *рис. 10*. Зависимость яркостной температуры гладкой поверхности океана $T_{\text{яо}}(\lambda) = \kappa_{\text{o}}(\lambda)T_{\text{o}}$ от температуры определяется зависимостью коэффициента излучения воды $\kappa_{\text{o}}(\lambda)$ от T_{o} . Разница между измеренными профилями $T_{\text{я}}(\lambda)$ и расчётными профилями $T_{\text{яо}}(\lambda)$ обусловлена влиянием на $\kappa_{\text{o}}(\lambda)$ вариаций волнения (скорости ветра), отличием ТПО при измерениях от средних климатических значений и излучением атмосферы. Влияние вариаций скорости ветра V наиболее заметно между 30 и 38° с. ш. и 45 и 60° ю. ш. (см. *рис. 1* и *10*), а влияние атмосферы — между 15 и 8° с. ш. (см. *рис. 1*), где из данных обработки $T_{\text{я}}(1,35)$ и $T_{\text{я}}(0,8)$ водозапас облаков $W > 1 \text{ кг/м}^2$. Пики на профилях $T_{\text{я}}(3,4)$ и $T_{\text{я}}(8,5)$ с амплитудами 35 и 5 К относительно фона свидетельствуют об осадках в области шириной примерно 300 км.

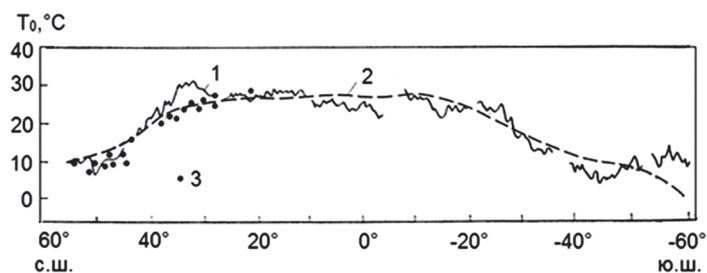


Рис. 10. Разрез температур поверхности Тихого океана, восстановленный из измерений на волне 8,5 см 23 сентября 1968 г. 1 — восстановленная температура; 2 — среднеклиматическая температура; 3 — судовые данные (Башаринов др., 1971а)

Зависимость от длины волны амплитуды приращений $T_{я}$, обусловленных ветром, выражена заметно меньше, чем приращений $T_{я}$, вызванных облачностью и дождём, что позволяет оценить и минимизировать влияние атмосферы. В целом получено хорошее согласие восстановленных значений ТПО с судовыми измерениями: среднеквадратичная погрешность составила $\sim 1-2^\circ\text{C}$ (Башаринов и др., 1971a; Марцинкевич, Матвеев, 1971; Шутко, 1986; Basharinov et al., 1971).

При обобщении яркостных температур, зафиксированных над океаном на четырёх длинах волн со спутника «Космос-243», и измерений скорости ветра у поверхности получены оценки крутизны радиационно-ветровой зависимости (геофизической модельной функции) в диапазоне скорости ветра от 0–5 до 18–22 м/с (Башаринов, Шутко, 1971; Шутко, 1986). При $V > 7$ м/с крутизна $\Delta T_{я}/\Delta V \approx 0,8-0,9$ К/(м/с) на длинах волн 0,8 и 1,35 см и уменьшается до 0,55–0,6 К/(м/с) на длинах волн 3,4 и 8,5 см. В последующие годы были продолжены экспериментальные и теоретические исследования связи спектра коэффициента излучения взволнованной морской поверхности со скоростью ветра, что позволило разработать алгоритмы восстановления V по спутниковым СВЧ-измерениям (Кутуза и др., 2015).

Морские и материковые льды (Антарктида, Гренландия)

По измерениям спутника «Космос-243» были получены принципиально новые результаты относительно СВЧ-излучения материковых льдов Антарктиды и Гренландии и морских льдов вокруг Антарктиды (Башаринов и др., 1969, 1971, 1974; Гурвич и др., 1973). Разность электрофизических свойств солёной воды, морских и материковых льдов позволяет надёжно различать типы поверхности по $T_{я}(\lambda)$. На *рис. 11* чётко выделяются материковые льды Антарктиды, шельфовый лёд в море Росса, морской лёд и открытая вода океанов.

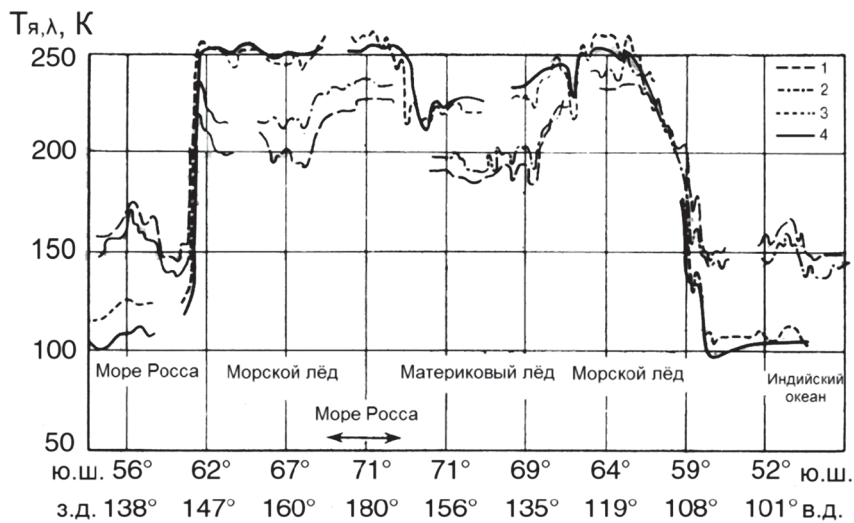
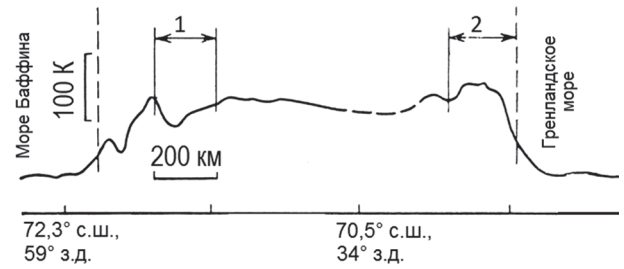


Рис. 11. Профили яркостной температуры над океаном, морским льдом и материковыми льдами Антарктиды на длинах волн 0,8 см (1); 1,35 (2); 3,4 (3) и 8,5 см (4)

Яркостная температура материковых льдов Антарктиды $T_{я}(\lambda)$ заметно ниже, чем окружающих её однолетних морских льдов (см. *рис. 11*), поскольку глубина проникновения электромагнитных волн в пресноводный материковый лёд намного больше, чем в солёный морской, и увеличивается при росте длины волны. Кроме того, температура материковых льдов с глубиной уменьшается. Перепад $T_{я}$ между однолетними морскими и материковыми льдами на каналах 0,8 и 1,35 см больше, чем на 3,4 и 8,5 см. В то же время перепад $T_{я}$ между морским льдом и открытым океаном на длинах волн 3,4 и 8,5 см больше, чем на 0,8 и 1,35 см, из-за заметно более низкой яркостной температуры океана (см. *рис. 11*).

Рис. 12. Профиль яркостной температуры на длине волны 3,4 см над Гренландией и морями Баффина и Гренландским. 1 — материковый лёд; 2 — морской лёд у побережья острова



В северном полушарии районом, подобным Антарктиде по особенностям ледяного покрова и режиму температуры, является Гренландия. Характерный профиль яркостной температуры при пересечении орбитой спутника «Космос-243» Гренландии приведён на рис. 12.

В период измерений над Антарктидой и омывающими её морями проекции последовательных витков спутника проходили близко друг от друга, что позволило построить карту сплочённости льдов C путём обработки данных спутника «Космос-243» за 4 сут (23–26 сентября 1968 г.) (рис. 13). На карте были выделены две градации сплочённости $C \geq 0,5$ и $C < 0,5$ (Башаринов и др., 1971, 1974).

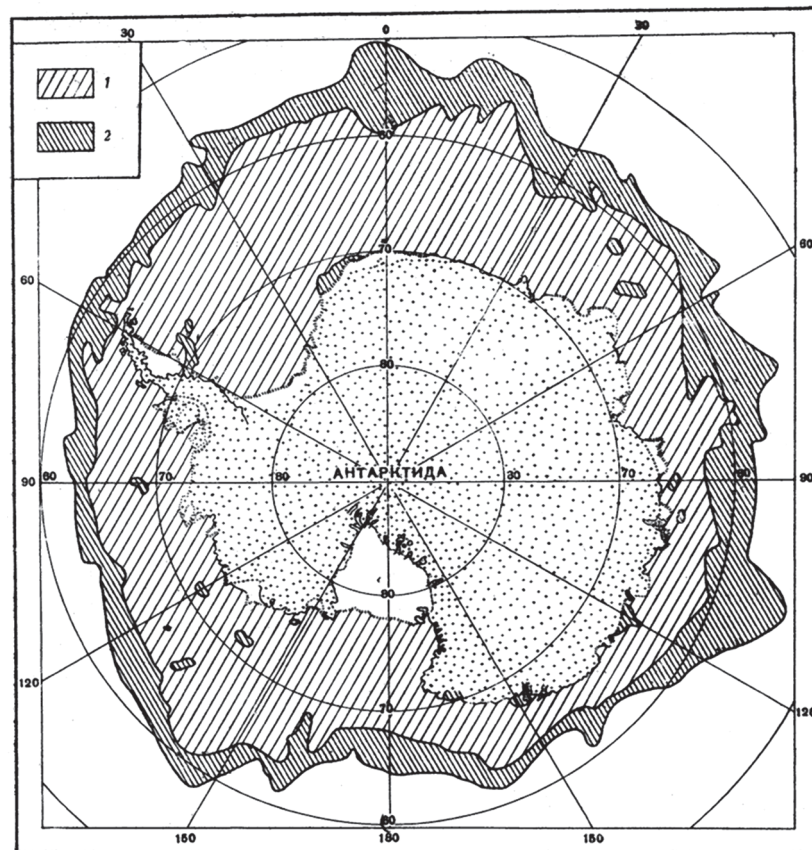


Рис. 13. Карта сплочённости морских льдов по данным ИСЗ «Космос-243»: 1 — $C \geq 0,5$; 2 — $C < 0,5$

Материковые покровы

Диэлектрические и излучательные характеристики земных покровов изменяются в широких пределах, что проявляется в вариациях яркостных температур. Профили $T_{я}$ над однородными областями (Сахара, Австралия, Восточная Сибирь и др.) отображают изменения температуры поверхности. В пустынях и полупустынях выявлены регулярные широтные вариации $T_{я}$, связанные с изменением среднемесячной температуры в приземном воздушном слое $T_{в}$. Так,

при измерениях 24 сентября 1968 г. от северного до южного побережий Австралии значения $T_{я}(8,5)$ уменьшились на 16–18 °С, что согласуется с перепадом температуры $T_{в}$ по данным метеостанций в 21 °С и с перепадом среднемесячных значений $T_{в}$ в сентябре в 11–13 °С (Башаринов и др., 1970, 1971б, 1974).

На профилях яркостных температур чётко выделяются области подстилающей поверхности с различной высотой и влажностью. Над горами (Гималаи, Анды и др.) интенсивность излучения (яркость) снижалась из-за уменьшения температуры воздуха с высотой и появления снега. На *рис. 14* приведён профиль $T_{я}(3,4)$, полученный при измерениях над Аравийским морем, Индией, Гималаями и пустыней Такла-Макан. При выходе на сушу яркостная температура возрастает на ~150 К относительно $T_{я}$ над морем. Приближение к массиву Гималаев сопровождается плавным понижением $T_{я}$, а над Гималаями $T_{я}$ уменьшается на ~40 К. Над пустыней Такла-Макан (высота над уровнем моря ~1300 м) яркостная температура снова растёт.

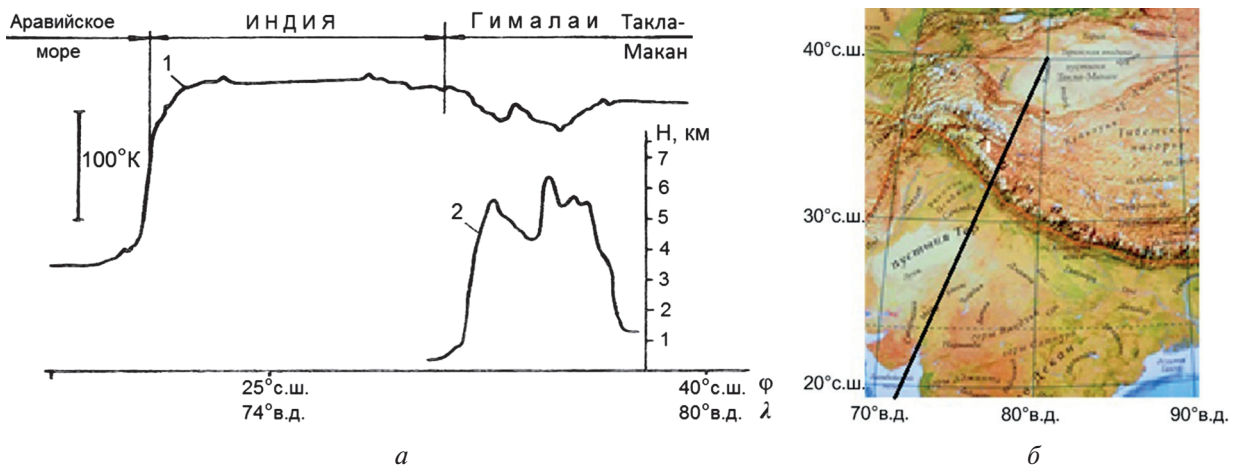


Рис. 14. Вариации яркостной температуры на длине волны 3,4 см над Аравийским морем, Индией, Гималаями и пустыней Такла-Макан (1) по измерениям 24 сентября 1968 г. и вариации высоты поверхности (2) при пересечении Гималаев и пустыни Такла-Макан (а); географическая карта района (б). Чёрная линия на *рис. 14б* — проекция орбиты спутника

На *рис. 15* показан профиль $T_{я}(8,5)$, полученный над влажными левобережными районами р. Ориноко (6–10° с. ш. и 65–70° з. д.) в северной части Южной Америки (Башаринов и др., 1969, 1970, 1971б). Понижения $T_{я}$ наблюдались также в зоне левобережья Нила (7–15° с. ш. и 23–28° в. д.) над Центральной Африкой.

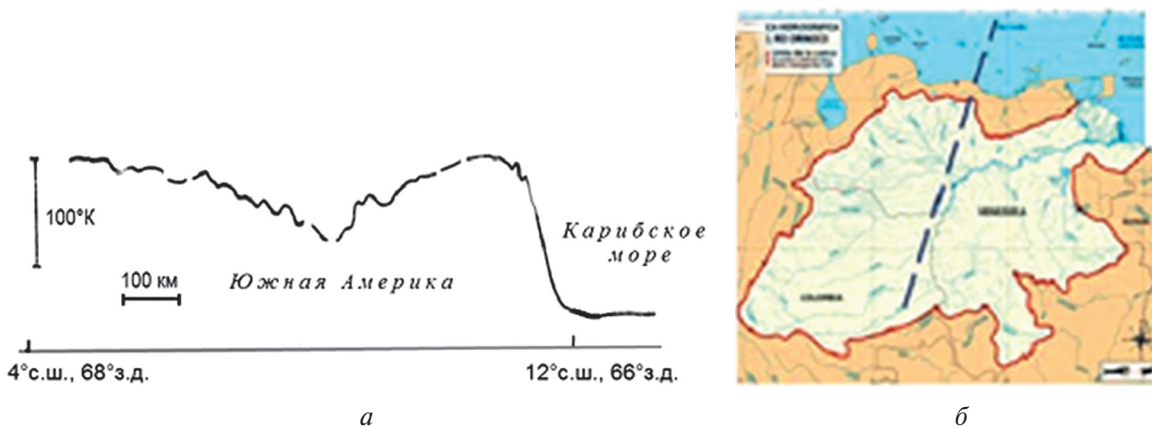


Рис. 15. Профиль яркостной температуры на длине волны 8,5 см над бассейном р. Ориноко в Южной Америке и над Карибским морем по измерениям 24 сентября 1968 г. (а); карта бассейна с проекцией орбиты спутника (б)

На снимках с метеорологических спутников района р. Ориноко была видна мощная кучевая облачность, и увлажнение поверхности из-за дождя было вполне вероятным. Обнаружение осадков над земными покровами выполнялось по $T_{\text{я}}(3,4)$ и $T_{\text{я}}(8,5)$. Яркостная температура на длинах волн 3,4 и 8,5 см снижается с повышением влажности подстилающей поверхности.

Подробные сведения о радиоизлучении земных покровов в различных районах земного шара по данным спутника «Космос-243» приведены в работах (Башаринов, Шутко, 1971; Башаринов и др., 1969, 1970, 1971б, 1974, 1975; Шутко, 1986).

Заключение

Результаты экспериментов на спутниках «Космос-243» и «Космос-384» (1970) обсуждались на заседаниях Президиума Академии наук СССР, национальных и международных конференциях и симпозиумах, в частности на 13-й Генеральной ассамблее COSPAR (Committee on Space Research, Комитет по космическим исследованиям при Международном совете по науке) (Ленинград, 1970), 15-й Генеральной ассамблее МГГС (Международного геодезического и геофизического союза) (Москва, 1971) и др. (Арманд, Башаринов, 1977; Башаринов и др., 1975). Сведения о становлении и первых этапах развития методов СВЧ-радиометрического зондирования природной среды приведены в работах (Горбунов, Кутуза, 2018; Kostianou et al., 2018; Wilson et al., 2006), а результаты обработки и анализа СВЧ-измерений опубликованы в статьях сотрудников ИРЭ РАН, ИФА РАН, ГГО, Гидрометцентра СССР. Эксперименты на спутниках «Космос-243» и «Космос-384» убедительно показали возможности СВЧ-радиометрии и ознаменовали начало нового направления спутниковой гидрометеорологии: пассивного микроволнового зондирования системы «атмосфера – подстилающая поверхность».

В последующие годы были продолжены экспериментальные и теоретические исследования, основными целями которых стало детальное изучение связей яркостной температуры $T_{\text{я}}(v_i, p, \theta)$, восстанавливаемой из космоса на разной поляризации p , углах падения θ , частотах v_i в диапазоне от 1 до 200 ГГц, с геофизическими параметрами P_j и разработка эффективных алгоритмов восстановления параметров $P_j = F[T_{\text{я}}(v_i, p, \theta)]$. Новые данные о вариациях спектра коэффициента излучения взволнованной морской поверхности со скоростью ветра V позволили разработать надёжные алгоритмы восстановления ТПО и V в полярных, умеренных и тропических условиях при различных состояниях атмосферы (Кутуза и др., 2015). Спутниковые МВ- и ИК-радиометры обеспечивают построение ежедневных глобальных полей этих важнейших характеристик Мирового океана.

Спутниковая СВЧ-радиометрия служит основой для ежедневного оперативного анализа ледовой обстановки, определения площади и сплочённости морских льдов в Арктике, Антарктике и в отдельных морях, для оценки климатических трендов.

Результаты, полученные в конце 60-х гг. прошлого века, показали возможности изучения земных покровов по СВЧ-радиометрическим измерениям, что было подтверждено в последующих наземных и спутниковых экспериментах. Значительный прогресс достигнут в использовании МВ-радиометрии для решения гидрологических проблем: мониторинга наводнений и засух, оценки влажности почвы и др. Приоритетными направлениями здесь являются зондирование в дециметровом диапазоне длин волн и совместное использование пассивных и активных МВ-измерений (Кутуза и др., 2015; Шутко, 1986).

Применительно к характеристикам атмосферы успешно развивается использование спутниковой СВЧ-радиометрии для построения интегральных полей: паросодержания атмосферы Q , водозапаса облаков W и интенсивности осадков R , которые применяются при анализе и краткосрочном прогнозе региональных и глобальных синоптических процессов, при изучении эволюции опасных атмосферных явлений: тропических, внетропических и полярных циклонов, атмосферных фронтов, холодных вторжений. Как правило, выполняется совместный анализ яркостной температуры и восстановленных полей Q , W , V и ТПО, а также данных

зондирования пассивных и активных спутниковых датчиков, работающих в видимом и ИК-диапазонах. Начало этим работам было положено при анализе МВ-экспериментов на спутнике «Космос-243» (Гурвич и др., 1970; Домбковская, Митник, 1970) и развивалось вместе с совершенствованием спутниковой аппаратуры.

Тщательно калиброванные яркостные температуры и валидированные продукты их обработки служат для построения зональных зависимостей содержания парообразной и капельной влаги в атмосфере над отдельными океанами и всём Мировым океаном $Q = F(\varphi)$ и $W = F(\varphi)$, где φ — широта. Впервые зональные зависимости по спутниковым данным (рис. 16) были получены при обработке измерений со спутника «Космос-243» (Аквилонова, Кутуза, 1978; Аквилонова и др., 1970; Башаринов, Митник, 1970). Из сравнения их с последующими спутниковыми данными за сентябрь следует хорошее соответствие формы зависимостей и абсолютных значений Q и W . Оценки массы водяного пара M_Q и капельной воды в облаках M_W в атмосфере Земли по данным спутника «Космос-243» в предположении, что значения Q и W в каждой широтной зоне над сушей такие же, как над океаном, также близки к значениям, полученным впоследствии, что свидетельствует о высоком уровне моделирования переноса МВ-излучения в системе «атмосфера – океан» и разработанных алгоритмов восстановления параметров.

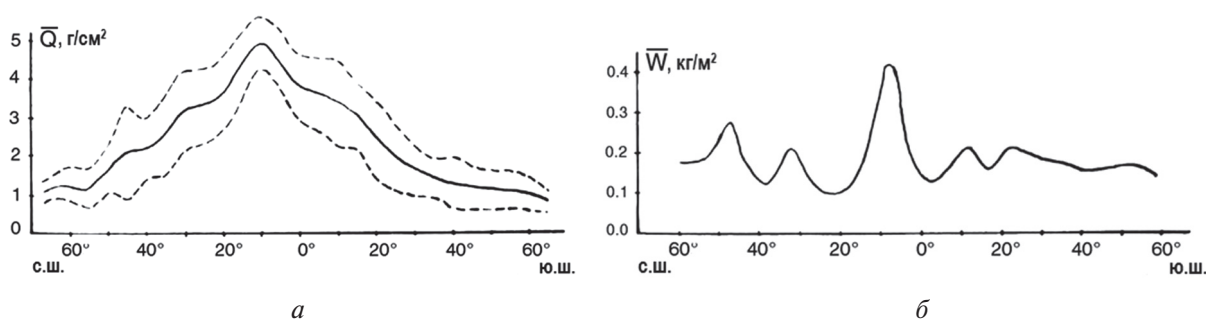


Рис. 16. Широтные распределения паросодержания атмосферы Q (а) и водозапаса облаков W (б) по данным СВЧ-измерений со спутника «Космос-243» 23–27 сентября 1968 г.

После пионерских СВЧ-радиометрических измерений на четырёх длинах волн с ИСЗ «Космос-243» прошло более 50 лет. В июне 2014 г. был выведен на орбиту метеорологический спутник «Метеор-М» № 2 с 29-канальным сканирующим радиометром МТВЗА-ГЯ на борту (Чернявский и др., 2018; Mitnik et al., 2017). Измерения радиометра продолжались до 15 августа 2017 г. Пятого июля 2019 г. с космодрома «Восточный» был запущен спутник «Метеор-М» № 2-2 с усовершенствованным МВ-радиометром на борту. Измерения ведутся в диапазоне частот от 6,9 до 190 ГГц на 31-м канале.

Работа выполнена в рамках Государственного задания и при частичной поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук «Дальний Восток» № 18-И-010.

Литература

1. Аквилонова А. Б., Кутуза Б. Г. Радиотепловое излучение облаков // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. № 9. С. 1792–1806.
2. Аквилонова А. Б., Кутуза Б. Г., Митник Л. М. Широтное распределение интегральной водности облаков над земным шаром по данным измерений с ИСЗ «Космос-243»: препринт. М.: ИРЭ АН СССР, 1970. 12 с.
3. Аквилонова А. Б., Крылова М. С., Кутуза Б. Г., Митник Л. М. Некоторые характеристики фронтальной облачности по данным СВЧ-радиометрических измерений со спутника «Космос-243»: препринт № 58. М.: ИРЭ АН СССР, 1971. 20 с.

4. *Алексеева И. А., Митник Л. М.* Структура внутритропической зоны конвергенции по данным радиометрических измерений со спутника «Космос-243»: препринт. М.: ИРЭ АН СССР, 1970. 20 с.
5. *Арманд Н. А., Башаринов А. Е.* Исследование Земли с летательных аппаратов. Результаты, полученные с помощью радиофизических методов: научное сообщение на заседании Президиума АН СССР. 1977. С. 28–38.
6. *Башаринов А. Е., Кутуза Б. Г.* Исследование радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 1968. Вып. 222. С. 100–110.
7. *Башаринов А. Е., Митник Л. М.* Особенности поля влажности над океаном по данным радиометрических сверхвысокочастотных измерений с ИСЗ «Космос-243» // Метеорология и гидрология. 1970. № 10. С. 13–18.
8. *Башаринов А. Е., Шутко А. М.* Исследование взаимосвязи характеристик поля теплового радиоизлучения с состоянием поверхности акваторий: препринт № 63. М.: ИРЭ АН СССР, 1971. 29 с.
9. *Башаринов А. Е., Егоров С. Т., Колосов М. А., Кутуза Б. Г.* Особенности метода сверхвысокочастотного радиометрического зондирования атмосферы с летательных аппаратов // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 1968. Вып. 222. С. 153–158.
10. *Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т.* Определение геофизических параметров по данным теплового радиоизлучения, полученного со спутника «Космос-243» // Докл. Акад. наук СССР. 1969. Т. 188. С. 1273–1276.
11. *Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Тучков Л. Т., Шифрин К. С.* Исследование поля радиотеплового излучения Земли // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1970. Т. 6. № 4. С. 366–381.
12. *Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т., Жуков В. И., Курская А. А., Малафеев Л. И., Матвеев Д. Т., Михайлов А. С., Шутко А. М.* (1971а) Результаты наблюдения радиоизлучения земной поверхности по данным эксперимента на ИСЗ «Космос-243» // Космические исследования. 1971. Т. 9. Вып. 2. С. 268–279.
13. *Башаринов А. Е., Курская А. А., Тучков Л. Т.* (1971б) Измерение микроволнового излучения ледовых покровов в полярных районах: препринт № 69. М.: ИРЭ АН СССР, 1971. 17 с.
14. *Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
15. *Башаринов А. Е., Бородин Л. Ф., Гурвич А. С., Малкевич М. С., Шутко А. М.* Исследование состояния материковых покровов и акваторий методами СВЧ радиометрии // Успехи физ. наук. 1975. Т. 16. Вып. 4. С. 743–746.
16. *Горбунов М. Е., Кутуза Б. Г.* «Космос-243» — начало развития методов микроволновой радиометрии атмосферы и поверхности Земли // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 321–329.
17. *Горелик А. Г., Калашников В. В., Фролов Ю. А.* Определение общего влагосодержания атмосферы по её собственному радиоизлучению // Тр. Центральной аэролог. обсерватории. Спутниковая метеорология. 1972. Вып. 103. С. 3–20.
18. *Гурвич А. С., Егоров С. Т.* Определение температуры поверхности моря по её тепловому радиоизлучению // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 3. С. 305–308.
19. *Гурвич А. С., Тиме Н. С.* О вариациях поглощения и яркостной температуры атмосферы // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 8. С. 814–819.
20. *Гурвич А. С., Демин В. В.* Определение полной массы водяного пара в атмосфере по измерениям спутника «Космос-243» // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1970. Т. 6. С. 453–457.
21. *Гурвич А. С., Кутуза Б. Г.* «Космос-243» — первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 14–25.
22. *Гурвич А. С., Демин В. В., Домбковская Е. П.* Использование спутниковых карт общего влагосодержания в синоптическом анализе // Метеорология и гидрология. 1970. № 8. С. 30–35.
23. *Гурвич А. С., Калинин В. И., Матвеев Д. Т.* Влияние внутренней структуры ледников на их тепловое радиоизлучение // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 12. С. 1247–1256.
24. *Домбковская Е. П., Митник Л. М.* Комплексный анализ результатов измерений со спутников электромагнитного излучения в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах: препринт. М.: ИРЭ АН СССР, 1970. 18 с.
25. *Жевакин С. А., Наумов А. Л.* Распространение сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в земной атмосфере // Изв. высших учеб. заведений. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1213–1243.
26. *Кутуза Б. Г., Митник Л. М., Шутко А. М.* Яркостные контрасты облаков и дождей в сверхвысокочастотном диапазоне // Тр. Гидрометцентра СССР. 1969. Вып. 50. С. 86–92.
27. *Кутуза Б. Г., Данилычев М. И., Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли. Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 336 с.

28. *Марцинкевич Л. М., Матвеев Д. Т.* О связи уходящего микроволнового излучения с состоянием поверхности моря (по данным спутника «Космос-243») // *Метеорология и гидрология*. 1971. № 8. С. 50–56.
29. *Матвеев Д. Т.* Экспериментальное исследование температурного поля морской поверхности по её тепловому излучению в радиодиапазоне // *Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана*. 1968. Т. 4. № 5. С. 508–517.
30. *Митник Л. М.* Методика определения влагосодержания атмосферы по радиометрическим измерениям сверхвысокочастотного излучения с ИСЗ // *Тр. Гидрометцентра СССР*. 1969. Вып. 50. С. 94–102.
31. *Митник Л. М.* Измерения влагосодержания над акваториями океанов с помощью СВЧ радиометров, установленных на спутнике «Космос-243» // *Тр. Центральной аэролог. обсерватории. Спутниковая метеорология*. 1972. Вып. 103. С. 64–72.
32. *Митник Л. М., Шутко А. М.* О влиянии состояния морской поверхности на точность определения влагосодержания атмосферы и водозаписа облаков при радиометрических измерениях с искусственных спутников Земли // *Метеорология и гидрология*. 1970. № 10. С. 72–75.
33. *Обухов А. М., Татарская М. С.* Поле интегрального влагосодержания атмосферы над Южным полушарием по измерениям теплового радиоизлучения на спутнике «Космос-243» // *Метеорология и гидрология*. 1969. № 11. С. 36–39.
34. *Обухов А., Ильичев Д., Башаринов А., Гурвич А., Егоров С.* Радиотелескопы смотрят на Землю // *Правда*. 21 янв. 1969. № 21(18434).
35. *Обухов А. М., Башаринов А. Е., Васильев А. С., Гурвич А. С., Демин В. В., Егоров С. Т., Кутуза Б. Г., Малафеев Л. И., Матвеев Д. Т., Митник Л. М., Федоров Н. К.* Исследование атмосферы по собственному радиотепловому излучению на ИСЗ «Космос-243» // *Космич. исслед.* 1971. Т. 9. № 1. С. 66–73.
36. *Рабинович Ю. И., Шукин Г. Г.* Определение содержания водяного пара в атмосфере по измерению микроволнового излучения // *Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова*. 1968. Вып. 222. С. 62–73.
37. Радиометрический способ обнаружения областей дождевых образований с ЛА: а. с. 228096 СССР / Башаринов А. Е., Егоров С. Т., Колосов М. А., Кутуза Б. Г. № 951474/38. 1963.
38. *Соломонович А. Е., Атаев О. М.* Тепловое излучение и поглощение в земной атмосфере радиоволн 8 мм диапазона // *Изв. высших учеб. заведений. Радиофизика*. 1960. Т. 3. № 4. С. 606–613.
39. Тихий океан. Т. 2. Гидрология Тихого океана. М.: Наука, 1968. 524 с.
40. *Тучков Л. Т., Башаринов А. Е., Колосов М. А., Курская А. А.* Тепловое радиоизлучение ледяного покрова в СВЧ-диапазоне // *Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова*. 1968. Вып. 222. С. 159–161.
41. *Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л., Черный И. В.* Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника Метеор-М № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100.
42. *Шифрин К. С., Рабинович Ю. И., Шукин Г. Г.* Исследование поля микроволнового излучения в атмосфере // *Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова*. 1968. Вып. 222. С. 5–18.
43. *Шутко А. М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
44. *Basharinov A. E., Egorov S. T., Gurvich A. S., Obuchov A. M.* Some results of microwave sounding of the atmosphere and ocean from the satellite Cosmos-243 // *Space Research*. 1971. V. 11. P. 593–600.
45. *Katsaros K. B., Mitnik L. M., Black P. G.* Microwave instruments for observing tropical cyclones // *Typhoon Impacts and Crisis Management*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. P. 5–61.
46. *Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Kopelevich O. V., Kudryavtsev V. N., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mitnik L. M., Mityagina M. I., Smirnov V. G., Stanichny S. V., Troitskaya Yu. I.* Ocean Remote Sensing in Russia / ed. S. Liang // *Comprehensive Remote Sensing*. Oxford: Elsevier, 2018. V. 8. P. 284–325.
47. *Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A. M., Cherniavsky G., Cherny I.* Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: modeling, calibration and measurements // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10. No. 7. P. 3036–3045.
48. *Wilson W. S., Fellous J.-L., Kawamura H., Mitnik L.* A history of oceanography from space // *Remote Sensing of Environment. Manual of remote sensing*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2006. V. 6. P. 1–31.

The world's first experiment on microwave Earth sensing from space on the Kosmos-243 satellite

B. G. Kutuza¹, L. M. Mitnik², A. B. Akvilonova³

¹ V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS
Moscow 125009, Russia
E-mail: kutuza@cplire.ru

² V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: lm_mitnik@mail.ru

³ V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: anna@ire.rssi.ru

September 23, 2018, it was 50 years since the launch of the Kosmos-243 satellite into orbit with four microwave radiometers that measured the thermal radiation of the atmosphere and the Earth surface at wavelengths: 0.8, 1.35, 3.4 and 8.5 cm. The history of research on the development of microwave radiometric techniques of remote sensing of natural environment and creation of equipment that was ahead of the time is presented. The characteristics of the radiometers, the main results of the experiment and the possibility of joint analysis of microwave measurements and visible and infrared satellite data are considered. For the first time, total water content in the clouds W , water vapor in the atmosphere Q , and ocean surface temperature were simultaneously retrieved, areas of precipitation and storm winds were revealed. According to satellite data, water vapor fields were mapped, W and Q dependences on latitude were obtained for individual oceans and for the entire World Ocean, the masses of water vapor and water in clouds in the Earth atmosphere were estimated; the increments of brightness temperatures in atmospheric fronts, in precipitation zones, in the intratropical convergence zone were determined. Edge position and concentration of sea ice around Antarctica were determined, and the features of microwave radiation from continental ice were explained. For terrestrial covers, the effects of moisture and structure of the upper layer of the surface and relief on brightness temperature were shown. Nowadays the direction of remote sensing from space initiated by the world's first experiment on Kosmos-243 is still being intensively developed.

Keywords: microwave sounding of the Earth, Kosmos-243, retrieval of geophysical parameters

Accepted: 18.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-9-30

References

1. Akvilonova A. B., Kutuza B. G., Radioteplovoe izluchenie oblakov (Microwave radiothermal emission of clouds), *Radiotekhnika i elektronika*, 1978, Vol. 23, No. 9, pp. 1792–1806.
2. Akvilonova A. B., Kutuza B. G., Mitnik L. M., *Shirotnoe raspredelenie integral'noi vodnosti oblakov nad zemnym sharom po dannym izmerenii s ISZ "Kosmos-243": preprint* (Latitudinal distribution of the integrated cloud liquid water content over the globe from "Kosmos-243" satellite measurements: preprint), Moscow: IRE AN SSSR, 1970, 12 p.
3. Akvilonova A. B., Krylova M. S., Kutuza B. G., Mitnik L. M., *Nekotorye kharakteristiki frontal'noi oblachnosti po dannym SVCh radiometricheskikh izmerenii so sputnika "Kosmos-243": preprint No. 58* (Some characteristics of frontal cloudiness from "Kosmos-243" satellite microwave radiometric measurements: preprint No. 58), Moscow: IRE AN SSSR, 1971, 20 p.
4. Alekseeva I. A., Mitnik L. M., *Struktura vnutritropicheskoi zony konvergentsii po dannym radiometricheskikh izmerenii so sputnika "Kosmos-243": preprint* (The structure of the intratropical convergence zone from "Kosmos-243" satellite microwave radiometric measurements: preprint), Moscow: IRE AN SSSR, 1970, 20 p.
5. Armand N. A., Basharinov A. E., *Issledovanie Zemli s letatel'nykh apparatov. Rezul'taty, poluchennye s pomoshch'yu radiofizicheskikh metodov: nauchnoe soobshchenie na zasedanii Prezidiuma AN SSSR* (The study of the Earth from flying apparatuses. Results obtained with the usage of radiophysical methods), 1977, pp. 28–38.

6. Basharinov A. E., Kutuza B. G., Issledovanie radioizlucheniya i pogloshcheniya oblachnoi atmosfery v milimetrovom i santimetrovom diapazonakh voln (Investigation of radio emission and absorption of a cloudy atmosphere in millimeter and centimeter wavelengths), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii imeni A. I. Voeikova*, 1968, Issue 222, pp. 100–110.
7. Basharinov A. E., Mitnik L. M., Osobennosti polya vlazhnosti nad okeanom po dannym radiometricheskikh sverkhvysokochastotnykh izmerenii s ISZ “Kosmos-243” (Features of the humidity field over the ocean according to radiometric microwave measurements from satellite “Kosmos-243”), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1970, No. 10, pp. 13–18.
8. Basharinov A. E., Shutko A. M., *Issledovanie vzaimosvyazi kharakteristik polya teplovogo radioizlucheniya s sostoyaniem poverkhnosti akvatorii: preprint No. 63* (Investigation of the relationship of the characteristics of thermal radio emission field with the water surface state: preprint No. 63), Moscow: IRE AN SSSR, 1971, 29 p.
9. Basharinov A. E., Egorov S. T., Kolosov M. A., Kutuza B. G., Osobennosti metoda sverkhvysokochastotnogo radiometricheskogo zondirovaniya atmosfery s letatel'nykh apparatov (Specific features of the method of microwave radiometric sounding of the atmosphere from flying apparatus), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii imeni A. I. Voeikova*, 1968, Issue 222, pp. 153–158.
10. Basharinov A. E., Gurvich A. S., Egorov S. T., Opredelenie geofizicheskikh parametrov po dannym teplovogo radioizlucheniya, poluchennogo so sputnika “Kosmos 243” (Determination of geophysical parameters using thermal radioemission data obtained from “Kosmos 243” satellite), *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1969, Vol. 188, pp. 1273–1276.
11. Basharinov A. E., Gurvich A. S., Tuchkov L. T., Shifrin K. S., Issledovanie polya radioteplovogo izlucheniya Zemli (Investigation of the field of the Earth radiothermal emission), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1970, Vol. 6, No. 4, pp. 366–381.
12. Basharinov A. E., Gurvich A. S., Egorov S. T., Zhukov V. I., Kurskaya A. A., Malafeev L. I., Matveev D. T., Mikhailov A. S., Shutko A. M. (1971a), Rezul'taty nablyudeniya radioizlucheniya zemnoi poverkhnosti po dannym eksperimenta na ISZ “Kosmos-243” (Results of radio emission observation of the Earth's surface according to the data of the experiment on the “Kosmos-243” satellite), *Kosmicheskie issledovaniya*, 1971, Vol. 9, Issue 2, pp. 268–279.
13. Basharinov A. E., Kurskaya A. A., Tuchkov L. T. (1971b), *Izmerenie mikrovolnovogo izlucheniya ledovykh pokrovov v polyarnykh raionakh: preprint No. 69* (Measurement of microwave radiation from ice covers in polar regions: preprint No. 69), Moscow: IRE AN SSSR, 1971, 17 p.
14. Basharinov A. E., Gurvich A. S., Egorov S. T., *Radioizluchenie Zemli kak planety* (Radioemission of the Earth as a planet), Moscow: Nauka, 1974, 188 p.
15. Basharinov A. E., Borodin L. F., Gurvich A. S., Malkevich M. S., Shutko A. M., Issledovanie sostoyaniya materikovykh pokrovov i akvatorii metodami SVCh radiometrii (Investigation of the state of continental covers and water areas using microwave radiometry methods), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1975, Vol. 16, Issue 4, pp. 743–746.
16. Gorbunov M. E., Kutuza B. G., “Kosmos-243” — nachalo razvitiya metodov mikrovolnovoi radiometrii atmosfery i poverkhnosti Zemli (Cosmos-243 as the Starting Point for the Development of Microwave Radiometry Methods of the Earth's Atmosphere and Surface), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 2018, Vol. 34, No. 3, pp. 321–329.
17. Gorelik A. G., Kalashnikov V. V., Frolov Yu. A., Opredelenie obshchego vlagosoderzhaniya atmosfery po ee sobstvennomu radioizlucheniyu (Determination of the total moisture content of the atmosphere from its own radio emission), *Trudy Tsentral'noi aerologicheskoi observatorii. Sputnikovaya meteorologiya*, 1972, Issue 103, pp. 3–20.
18. Gurvich A. S., Egorov S. T. (1966a), Opredelenie temperatury poverkhnosti morya po ee teplovomu radioizlucheniyu (Determination of the sea surface temperature by its thermal radiation), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1966, Vol. 2, No. 3, pp. 305–308.
19. Gurvich A. S., Time N. S. (1966b), O variatsiyakh pogloshcheniya i yarkostnoi temperatury atmosfery (On variations in the absorption and brightness temperature of the atmosphere), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1966, Vol. 2, No. 8, pp. 814–819.
20. Gurvich A. S., Demin V. V., Opredelenie polnoi massy vodyanogo para v atmosfere po izmereniyam sputnika “Kosmos-243” (Determination of the total water vapor content in the atmosphere from “Kosmos-243” measurements), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1970, Vol. 6, pp. 453–457.
21. Gurvich A. S., Kutuza B. G., “Kosmos-243” — pervyi v mire eksperiment po issledovaniyu Zemli iz kosmosa radiofizicheskimi metodami (“Cosmos-243” — the First Experiment in the World on the Earth Research from Space Using Radiophysical Methods), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 2, pp. 14–25.
22. Gurvich A. S., Demin V. V., Dombkovskaya E. P., Ispol'zovanie sputnikovykh kart obshchego vlagosoderzhaniya v sinopticheskom analize (Using satellite charts of total water vapor content in synoptic analysis), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1970, No. 8, pp. 30–35.

23. Gurvich A. S., Kalinin V. I., Matveev D. T., Vliyanie vnutrennei struktury lednikov na ikh teplovoe radioizluchenie (The influence of the internal structure of glaciers on their thermal radio emission), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1973, Vol. 9, No. 12, pp. 1247–1256.
24. Dombkovskaya E. P., Mitnik L. M., *Kompleksnyi analiz rezul'tatov izmerenii so sputnikov elektromagnitnogo izlucheniya v opticheskom, infrakrasnom i radiodiapazonakh: Preprint* (Comprehensive analysis of measurement results from satellites of electromagnetic radiation in the optical, infrared and radio ranges: Preprint), Moscow: IRE AN SSSR, 1970, 18 p.
25. Zhevakin S. A., Naumov A. L., Rasprostranenie santimetrovykh, millimetrovykh i submillimetrovykh radiovoln v zemnoi atmosfere (Propagation of centimeter, millimeter and submillimeter radio waves in the earth's atmosphere), *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 1967, Vol. 10, No. 9–10, pp. 1213–1243.
26. Kutuza B. G., Mitnik L. M., Shutko A. M., Yarkostnye kontrasty oblakov i dozhdei v sverkhvysokochastotnom diapazone (Brightness contrasts of clouds and rain in the microwave range), *Trudy Gidromettsentra SSSR*, 1969, Issue 50, pp. 86–92.
27. Kutuza B. G., Danilychev M. I., Yakovlev O. I., *Sputnikovyi monitoring Zemli. Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth. Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: LENAND, 2015, 336 p.
28. Martsinkevich L. M., Matveev D. T., O svyazi ukhodyashchego mikrovolnovogo izlucheniya s sostoyaniem poverkhnosti morya (po dannym sputnika “Kosmos-243”) (About the relationship of the outgoing microwave radiation with the state of the sea surface (from “Kosmos-243” satellite)), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1971, No. 8, pp. 50–56.
29. Matveev D. T., Eksperimental'noe issledovanie temperaturnogo polya morskoi poverkhnosti po ee teplovomu izluchenyu v radiodiapazone (Experimental study of the temperature field of the sea surface from its thermal radiation in the radio range), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1968, Vol. 4, No. 5, pp. 508–517.
30. Mitnik L. M., Metodika opredeleniya vlagosoderzhaniya atmosfery po radiometricheskim izmereniyam sverkhvysokochastotnogo izlucheniya s ISZ (Method of determination of the total water vapor content of the atmosphere by microwave radiometric measurements from a satellite), *Trudy Gidromettsentra SSSR*, 1969, Issue 50, pp. 94–102.
31. Mitnik L. M., Izmereniya vlagosoderzhaniya nad akvatoriyami okeanov s pomoshch'yu SVCh radiometrov, ustanovlennykh na sputnike “Kosmos-243” (Measurement of water vapor content over the oceans using microwave radiometers onboard “Kosmos-243” satellite), *Trudy Tsentral'noi aerologicheskoi observatorii. Sputnikovaya meteorologiya*, 1972, Issue 103, pp. 64–72.
32. Mitnik L. M., Shutko A. M., O vliyanií sostoyaniya morskoi poverkhnosti na tochnost' opredeleniya vlagosoderzhaniya atmosfery i vodozapasa oblakov pri radiometricheskikh izmereniyakh s iskusstvennykh sputnikov Zemli (On the influence of the sea surface state on the accuracy of determination of total atmospheric water vapor content and total cloud liquid water content from satellite radiometric measurements), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1970, No. 10, pp. 72–75.
33. Obukhov A. M., Tatarskaya M. S., Pole integral'nogo vlagosoderzhaniya atmosfery nad Yuzhnym polushariem po izmereniyam teplovogo radioizlucheniya na sputnike “Kosmos-243” (The field of the integrated water vapor content of the atmosphere over the Southern Hemisphere from measurements of thermal radioemission on the “Kosmos-243” satellite), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1969, No. 11, pp. 36–39.
34. Obukhov A., Il'ichev D., Basharinov A., Gurvich A., Egorov S., Radioteleskopy smotryat na Zemlyu (Radiotelescopes look at the Earth), *Pravda*, 1969, No. 21(18434).
35. Obukhov A. M., Basharinov A. E., Vasil'ev A. S., Gurvich A. S., Demin V. V., Egorov S. T., Kutuza B. G., Malafeev L. I., Matveev D. T., Mitnik L. M., Fedorov N. K., Issledovanie atmosfery po sobstvennomu radioteplovomu izluchenyu na ISZ “Kosmos-243” (Investigation of the atmosphere by its own radiothermal radiation on the “Kosmos-243” satellite), *Kosmicheskie issledovaniya*, 1971, Vol. 9, No. 1, pp. 66–73.
36. Rabinovich Yu. I., Shchukin G. G., Opredelenie sodержaniya vodyanogo para v atmosfere po izmereniyu mikrovolnovogo izlucheniya (Determination of water vapor in the atmosphere by measuring microwave radiation), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii imeni A. I. Voeikova*, 1968, Issue 222, pp. 62–73.
37. *Radiometricheskii sposob obnaruzheniya oblastei dozhdevykh obrazovanií s LA* (Radiometric method of detection of areas of rain formations from flying apparatus (FA)), a.s. No. 228096 SSSR, Basharinov A. E., Egorov S. T., Kolosov M. A., Kutuza B. G., No. 951474/38, 1963.
38. Solomonovich A. E., Ataev O. M., Teplovoe izluchenie i pogloshchenie v zemnoi atmosfere radiovoln 8 mm diapazona (Heat radiation and absorption in the earth's atmosphere radio waves of 8 mm range), *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 1960, Vol. 3, No. 4, pp. 606–613.
39. *Tikhii okean. T. 2. Gidrologiya Tikhogo okeana* (Pacific Ocean. Vol. 2. Pacific Hydrology), Moscow: Nauka, 1968, 524 p.
40. Tuchkov L. T., Basharinov A. E., Kolosov M. A., Kurskaya A. A., Teplovoe radioizluchenie ledyanogo pokrova v SVCh-diapazone (Thermal radio emission of ice cover in the microwave range), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii imeni A. I. Voeikova*, 1968, Issue 222, pp. 159–161.

41. Chernyavskii G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Chernyi I. V., Mikrovolnovoe zondirovanie okeana, atmosfery i zemnykh pokrovov po dannym sputnika Meteor-M No. 2 (Microwave sensing of the Ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 78–100.
42. Shifrin K. S., Rabinovich Yu. I., Shchukin G. G., Issledovanie polya mikrovolnovogo izlucheniya v atmosfere (Investigation of the field of microwave radiation in the atmosphere.), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii imeni A. I. Voeikova*, 1968, Issue 222, pp. 5–18.
43. Shutko A. M., *SVCh-radiometriya vodnoi poverkhnosti i pochvogruntov* (Microwave radiometry of the water surface and soil), Moscow: Nauka, 1986, 190 p.
44. Basharinov A. E., Egorov S. T., Gurvich A. S., Obuchov A. M., Some results of microwave sounding of the atmosphere and ocean from the satellite Cosmos-243, *Space Research*, 1971, Vol. 11, pp. 593–600.
45. Katsaros K. B., Mitnik L. M., Black P. G., Microwave instruments for observing tropical cyclones, *Typhoon Impacts and Crisis Management*, Springer, 2014, pp. 5–61.
46. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Kopelevich O. V., Kudryavtsev V. N., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mitnik L. M., Mityagina M. I., Smirnov V. G., Stanichny S. V., Troitskaya Yu. I., Ocean Remote Sensing in Russia, *Comprehensive Remote Sensing*, Oxford: Elsevier, 2018, Vol. 8, pp. 284–325.
47. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A. M., Cherniavsky G., Cherny I., Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: modeling, calibration and measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 3036–3045.
48. Wilson W. S., Fellous J.-L., Kawamura H., Mitnik L., A history of oceanography from space, *Remote Sensing of Environment, Manual of remote sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, Vol. 6, pp. 1–31.