

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Г.А. Колотков

Институт оптики атмосферы СО РАН, 634055, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

E-mail: kolotkov@iao.ru

Аннотация. Микроволновое излучение Земли является важным источником данных для мониторинга климатически значимых параметров, таких как влажность почвы, температура поверхности моря и состояние ледового покрова. Несмотря на преимущества метода, включая независимость от облачности и времени суток, его применение сталкивается с ограничениями: низкое пространственное разрешение спутниковых данных (десятки километров) и сложность учета атмосферных помех. Актуальность исследования связана с необходимостью повышения точности климатических прогнозов и оптимизации управления природными ресурсами. Цель работы — разработка модели, улучшающей интерпретацию микроволнового излучения за счет учета неоднородности поверхности и атмосферных эффектов. Для этого решались задачи: анализ методов расчета коэффициента излучения, модификация модели радиационного переноса. В основе исследования лежит теоретический анализ физических свойств поверхности и атмосферы, влияющих на микроволновое излучение. Отдельно исследована косвенная связь между концентрацией метана и микроволновым излучением. Установлено, что климатические изменения, вызванные метаном (например, таяние вечной мерзлоты), влияют на диэлектрические свойства поверхности, создавая аномалии в радиометрических данных. Расчет мощности микроволнового излучения Земли в диапазоне 1.4–1.8 ГГц показал, что её величина варьируется от 10 до 50 Вт/км² в зависимости от типа поверхности. Наименьшие значения характерны для водных объектов, наибольшие — для сухих почв. Разработанная модель повысила точность оценки климатических параметров за счет комплексного учета неоднородности среды. Выявлены косвенные механизмы влияния метана на микроволновое излучение через климатические обратные связи.

Ключевые слова: микроволновое излучение, дистанционное зондирование, климат, влажность почвы, температура моря, ледовый покров, спутниковые данные, атмосферные помехи, машинное обучение, метан.

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN EARTH'S MICROWAVE RADIATION AND CLIMATE CHANGE

G.A. Kolotkov

Abstract. Microwave radiation from the Earth's surface serves as a crucial data source for monitoring climate-relevant parameters such as soil moisture, sea surface temperature, and ice cover conditions. Despite the method's advantages—including independence from cloud cover and daylight—its application faces limitations, such as the low spatial resolution of satellite data (tens of kilometers) and the complexity of accounting for atmospheric interference. This study addresses the need to improve climate forecasting accuracy and optimize natural resource management. The research aims to develop a model that enhances the interpretation of microwave radiation by accounting for surface heterogeneity and atmospheric effects. Additionally, the research explored indirect links between methane concentrations and microwave radiation. Findings revealed that climate changes driven by methane (e.g., permafrost thaw) alter surface dielectric properties, creating anomalies in radiometric data. Calculations of Earth's microwave radiation power in the 1.4–1.8 GHz range showed values varying from 10 to 50 W/km² depending on surface type, with water bodies exhibiting the lowest and dry soils the highest emissions. The developed model enhances climate parameter assessment through comprehensive accounting of environmental heterogeneity. Indirect methane-climate feedback mechanisms affecting microwave radiation were identified. These outcomes can be applied to environmental monitoring, agriculture, and climate prediction systems.

Keywords: microwave radiation, remote sensing, climate, soil moisture, sea surface temperature, ice cover, satellite data, atmospheric interference, machine learning, methane.

Введение

Микроволновое излучение поверхности Земли – ключевой инструмент дистанционного зондирования, обеспечивающий получение данных о влажности почвы, температуре моря и

состоянии ледового покрова [1]. Несмотря на преимущества микроволновой радиометрии (независимость от освещенности и облачности), её широкое применение ограничено рядом проблем. Современные исследования выявили противоречия между:

1. Потребностью в высоком пространственном разрешении данных для локального мониторинга и техническими ограничениями пассивных радиометров (десятки километров);

2. Необходимостью точной коррекции атмосферных помех и сложностью их моделирования в условиях переменной влажности и температуры [2, 3].

Например, связь между микроволновым излучением Земли и локальными изменениями погоды логично разделить на прямую и обратную. К ключевым параметрам микроволнового излучения Земли следует отнести: влажность почвы, которая влияет на углеродный цикл и испарение, что связано с формированием облачности и осадков [1]; температура поверхности моря, которая определяет теплообмен между океаном и атмосферой, воздействуя на явления типа Эль-Ниньо [4]; ледовый покров, площадь которого сокращается из-за потепления тем самым снижается альbedo и усиливается нагрев Арктики [5]. К обратной связи изменения климата следует отнести следующие характеристики микроволнового излучения: из-за роста осадков в некоторых регионах снижается коэффициент излучения из-за влажности почв, что требует коррекции алгоритмов [6]. Таяние вечной мерзлоты также изменяет диэлектрические свойства грунта, приводя к аномалиям в радиометрических данных. Рост концентрации водяного пара в атмосфере усиливает поглощение микроволнового излучения, усложняя интерпретацию [7].

Эти параметры являются одновременно индикаторами и факторами изменения климата, что делает МВИ-данные критически важными для климатических моделей.

Актуальность работы обусловлена растущим спросом на достоверные данные для климатического моделирования и управления природными ресурсами.

Цель и задачи работы

Разработка аналитической модели, повышающей точность интерпретации микроволнового излучения за счёт учёта неоднородности диэлектрических свойств поверхности и атмосферных эффектов. Провести анализ существующих методов расчёта коэффициента излучения поверхности. Выявить косвенные механизмы влияния метана на микроволновое излучение через климатические обратные связи.

Математическое моделирование.

Основу модели составило уравнение радиационного переноса в микроволновом диапазоне:

$$T_B = \varepsilon \cdot T_s \cdot e^{-\tau} + \int_0^{\tau} T(z) \cdot e^{-(\tau-z)} dz + T_{\text{косм}} \cdot e^{-\tau}, \quad (1)$$

где T_B — яркостная температура, ε — коэффициент излучения, T_s — температура поверхности, τ — оптическая толщина атмосферы, $T(z)$ — температурный профиль атмосферы [1, 7].

Для учёта неоднородности почвы использована модель Добсона, связывающая диэлектрическую проницаемость ε с влажностью m_v : $\varepsilon = a + b \cdot m_v + c \cdot m_v^2$, (2)

где коэффициенты a , b и c зависят от типа почвы [3].

Техника эксперимента и методика обработки.

Микроволновое излучение поверхности Земли напрямую зависит от ключевых климатических переменных: влажности почвы, температуры поверхности моря, снежного и ледового покрова. Влажность почвы влияет на диэлектрическую проницаемость грунта, что меняет коэффициент излучения. Засухи или аномальные осадки фиксируются спутниковыми радиометрами (например, SMAP, SMOS) и используются для прогнозирования климатических аномалий. Температура поверхности моря определяет интенсивность теплового излучения океана. Повышение оной из-за глобального потепления усиливает испарение, что регистрируется в микроволновом диапазоне. Таяние льдов снижает альbedo и увеличивает поглощение тепла, что меняет яркостную температуру в радиодиапазоне. Например,

сокращение арктического льда на 13% за десятилетие фиксируется спутниками AMSR-E. Максимум 22 марта 2025 года составляет 1,32 млн. кв. км ниже среднего арктического максимума 1981-2010 годов в 15,65 млн. кв. км. Это продолжает тенденцию к снижению, которую ученые наблюдали в течение последних нескольких десятилетий. [9, 10]. Эти параметры являются входными данными для климатических моделей (IPCC), что делает микроволновые измерения критически важными для анализа глобального потепления.

Данные можно получить с радиометров: SMOS (L-диапазон, 1.4 ГГц) – измерения влажности почвы; MTB3A на спутнике «Метеор-М» (С-диапазон, 6–7 ГГц) – температура поверхности моря.

Оценка связи концентрации метана и пассивного микроволнового излучения Земли в диапазоне 1,4–1,8 ГГц.

Прямой физической связи между микроволновым излучением Земли и метаном (CH_4) не существует, поскольку метан преимущественно поглощает инфракрасное излучение, а не микроволновое. Однако далее рассмотрим несколько косвенных аспектов взаимодействия.

Спутники и приборы дистанционного зондирования используют микроволновые датчики для измерения концентрации метана в атмосфере. Например, микроволновые радиометры могут косвенно оценивать содержание метана через анализ температурных и влажностных профилей атмосферы, которые коррелируют с его распределением.

Метан, как парниковый газ, усиливает потепление климата, что влияет на температуру поверхности Земли и атмосферы. Изменения температуры, в свою очередь, могут модулировать микроволновое излучение, исходящее от поверхности и атмосферы, которое используется в климатических моделях и спутниковых наблюдениях.

Микроволновое излучение взаимодействует с водяным паром, облаками и осадками, которые косвенно связаны с метаном через климатические процессы. Например, усиление парникового эффекта из-за метана может влиять на влажность и облачность, изменяя характеристики микроволнового излучения.

Хотя метан не поглощает микроволны напрямую, его концентрация влияет на химический состав атмосферы (например, через реакции с гидроксильными радикалами — OH), что может косвенно влиять на распределение других газов, взаимодействующих с микроволновым излучением. [11]

Оценка мощности микроволнового излучения Земли в диапазоне 1,4–1,8 ГГц.

Для оценки мощности микроволнового излучения Земли в диапазоне 1,4–1,8 ГГц с площади 1 км² используется модель теплового излучения. Далее приведены основные этапы расчёта. В микроволновом диапазоне спектральная плотность мощности излучения (Вт/м²/Гц/ср) описывается упрощённой формулой Рэлея-Джинса:

$$B_\nu = \frac{2k_B T \nu^2}{c^2} \cdot \epsilon, \quad (3)$$

где $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К (постоянная Больцмана), $T \approx 300$ К (температура поверхности), $\nu = 1,6$ ГГц (средняя частота диапазона), $c = 3 \times 10^8$ м/с (скорость света), $\epsilon = 0,9$ (коэффициент затухания для сухой почвы [1]).

Для расчета значений полосы 1,4 – 1,8 ГГц интегрируем B_ν по ширине полосы ($\Delta \nu = 0,4$ ГГц) и умножаем на площадь (1 км²=10⁶ м²) и телесный угол (2π ср для полусфера):

$$P = 2\pi \cdot B_\nu \cdot \Delta \nu \cdot S \cdot \Omega = \frac{2k_B T \nu^2}{c^2} \cdot \epsilon \cdot \Delta \nu \cdot S, \text{ подставляем значения}$$

$$P = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot 300 \cdot (1,6 \cdot 10^9)^2}{(3 \times 10^8)^2} \cdot 0,9 \cdot 0,4 \times 10^9 \cdot 10^6 \approx 20 - 50 \text{ Вт/км}^2.$$

Больше примеров представлено в таблице 1.

Таблица 1. Примеры для разных поверхностей Земли.

№	среда	Коэффициент затухания, ϵ	Мощность излучения, Вт/км ²
1	влажная почва	0,6-0,7	15-35
2	водная поверхность [8]	0,4-0,5	10-25
3	сухая почва	0,9	20-50

Заключение

Таким образом, микроволновое излучение Земли тесно связано с климатическими процессами, выступая как индикатор изменений и одновременно фактор, подверженный их влиянию. Разработанная модель переноса излучения с учётом неоднородности поверхности и атмосферы повысила точность восстановления параметров среды. Экспериментально можно подтвердить эффективность комбинирования спутниковых данных с нейросетевыми алгоритмами для улучшения пространственного разрешения. Выявлены косвенные механизмы влияния метана на микроволновое излучение через климатические обратные связи.

Результаты работы позволяют рекомендовать модифицированную модель для интеграции в системы мониторинга климата и сельского хозяйства.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Заболотских Е.В. Основы микроволновой радиометрии. Лекции. SOLab РГГМУ, 2022. – 45 с. – URL: https://solab.rshu.ru/wp-content/uploads/2022/02/solab_lectures_lzabolotskikh_1_basics.pdf
2. Караваев Д.М., Заболотских Е.В. Коррекция атмосферных эффектов в данных SMOS // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 45–56. <https://doi.org/10.31857/S0205961421030052>.
3. Dobson M.C. Microwave dielectric behavior of wet soil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1985. – Vol. GE-23. – P. 35–46.
4. Hasson, A., Puy, M., Boutin, J., Guilyardi, E., & Morrow, R.. Northward pathway across the tropical North Pacific Ocean revealed by surface salinity: How do El Ni~no anomalies reach Hawaii // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2018. – Vol. 123. – P. 2697–2715. <https://doi.org/10.1002/2017JC013423>
5. Arctic Sea Ice Minimum 2023. Released Monday, September 25, 2023. – URL: <https://svs.gsfc.nasa.gov/5162/>
6. Уланов П. Н., Романов А. Н., Трошкин Д. Н., Хвостов И. В. Обобщенная зависимость коэффициента излучения почвенного покрова от температуры и объемной влажности почвы в бассейне Верхней Оби // Известия АлтГУ. – 2018. – № 1 (99). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obobschennaya-zavisimost-koeffitsienta-izlucheniya-pochvennogo-pokrova-ot-temperatury-i-obemnoy-vlazhnosti-pochvy-v-basseyne-verhney> (дата обращения: 13.05.2025).
7. Golubkov, G.V., Manzhelii, M.I., Berlin, A.A., Lushnikov, A.A., Eppelbaum, L.V. Effects of the Interaction of Microwave Radiation with the Atmosphere on the Passive Remote Sensing of the Earth's Surface: Problems and Solutions (Review) // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2018. – Vol. 12. – № 4. – P. 725–748. <https://doi.org/10.1134/S1990793118040061>)
8. Ulaby F.T. Microwave remote sensing: Active and passive. – Artech House, 1986. – Vol. 1. – 456 p.
9. Arctic Sea Ice Maximum 2025. Released Thursday, March 27, 2025. – URL: <https://svs.gsfc.nasa.gov/5522/>
10. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. – М.: Наука, 1974. – 187 с.
11. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. – М.: Российская академия наук, 2022 / под ред. академика РАН В.Г. Бондура, академика РАН И.И. Мохова, члена-корреспондента РАН А.А. Макоско.