

О двух подходах к определению влаго- и водозапаса атмосферы

Д.П. Егоров¹, Б.Г. Кутуза¹

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корпус 7.
E-mail: e-mail@compute.su, kutuza@cplire.ru*

В докладе рассматриваются физические и статистические методы СВЧ-радиометрического восстановления влаго-и водозапаса атмосферы (полной массы водяного пара и водозапаса облаков). Обсуждаются преимущества и недостатки обоих подходов. На основе данных, полученных с помощью наземного радиометра-спектрометра К-диапазона, а также данных радиозондирования за 2019-2023 гг. проведен сравнительный анализ рассмотренных методов. Ключевые слова: атмосфера, СВЧ радиометрия, физические и статистические методы, яркостная температура, восстановление, влагосодержание, водозапас

On two approaches to atmospheric total water vapor and liquid water content retrieval

D.P. Egorov¹, B.G. Kutuza¹

¹ *Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.*

The report discusses physical and statistical methods for microwave radiometric reconstruction of atmospheric moisture content parameters including total water vapor and cloud liquid water content. The advantages and limitations of both approaches are explored. Based on data collected using a K-band ground-based radiometer-spectrometer and radiosonde data for the years 2019 to 2023, a comparative analysis of the methods under discussion is conducted. Keywords: atmosphere, microwave radiometry, physical and statistical methods, brightness temperature, retrieval, total water vapor, liquid water content

Введение

Принципиальная возможность решения обратных задач микроволнового зондирования атмосферы со спутников обусловлена тем, что в излучении Земли содержится информация о геофизических параметрах атмосферы и, в то же время, существуют способы разделить вклад собственно атмосферы и вклад от подстилающей поверхности [1]. Важным обстоятельством является также то, что молекулярные газы, облака и осадки по-разному трансформируют спектр и поляризацию микроволнового излучения в зависимости от высотных распределений температуры, влажности, водности, концентрации газов и других метеопараметров. С помощью СВЧ-радиометрического зондирования могут быть восстановлены следующие характеристики атмосферы: высотное распределение температуры; содержание и высотные распределения водяного пара и малых газовых составляющих (озон, окислы углерода и азота и др.), интегральные параметры облачной атмосферы: полная масса водяного пара, водозапас облаков, эффективная температура облаков, интенсивность дождя. Основным достоинством СВЧ радиометрии среди других методов дистанционного зондирования атмосферы является то, что эти характеристики могут быть оперативно восстановлены вне зависимости от текущих погодных условий, времени суток, освещенности или наличия облачности.

Существующие методы определения (восстановления, оценки) перечисленных характеристик по регистрируемому излучению можно условно разделить на физические и статистические. Физические методы несут в себе информацию о физике явлений и процессов, происходящих в системе «атмосфера – подстилающая поверхность». Лежащие в основе физических методов математические модели, связывающие целевые характеристики атмосферы с характеристиками излучения, получаются в результате теоретических построений и совершенствуются опытным путем. При условии, что состояние атмосферы хорошо известно, современные модели распространения радиоволн и вычислительные мощности позволяют произвести расчет частотного спектра ее излучения, т.е. решить прямую задачу, с достаточно высокой точностью. Основная же сложность вызвана тем фактом, что разным состояниям атмосферы могут соответствовать примерно одинаковые, то есть близкие по уровню и по форме спектры излучения (сюрьекция). При такой неоднозначности обратная задача расчета искомых геофизических параметров атмосферы по известным характеристикам излучения становится в математическом смысле некорректной. Таким образом, эффективность физических методов обусловлена не только точностью теоретических или теоретико-эмпирических формул, отражающих взаимосвязи между различными модельными параметрами. Большое значение имеют выбор способа разрешения упомянутой неоднозначности и качество математического аппарата, применяемого для обращения прямой задачи. В этой связи существующие физические методы можно дополнительно классифицировать как оптимизационные и неоптимизационные; использующие и не использующие регуляризацию. Оптимизационные методы можно также разделить на детерминированные, стохастические и комбинированные.

Статистические методы основаны на прямой статистической обработке большого объема данных контактных измерений (или реанализа) параметров атмосферы и совмещенных по пространству и по времени дистанционных измерений яркостной температуры ее излучения. Результатом такой обработки являются модели машинного обучения, в том числе регрессионные модели, способные вероятностным образом предсказывать значения целевых переменных по данным о яркостной температуре. С целью борьбы с переобучением моделей здесь также могут применяться методы регуляризации [2]. Статистические методы противопоставлены физическим в том смысле, что теоретические соображения, связанные с особенностями формирования и распространения радиоволн в атмосфере, часто намеренно не принимаются во внимание. Обученные модели, выгодно отличающиеся своим быстродействием и удобством в использовании, тем не менее, полностью определяются тем ансамблем измерений, на котором выполнялось их обучение, т.е. подбор весовых коэффициентов. Кроме того, они наследуют все ошибки измерений – как контактных, так и дистанционных [3]. В современных многопараметрических моделях машинного обучения полученные весовые коэффициенты вовсе теряют какой-либо физический смысл, из-за чего итоговая модель оказывается неинтерпретируемой.

Исчерпывающий обзор современных методов определения интегральных параметров атмосферы из космоса представлен в работе [3]. Отметим, что в задачах восстановления как высотных профилей температуры и влажности воздуха, так и интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы традиционным является именно физический подход [5-9]. Одними из первых статистических методов, которые составили здесь конкуренцию физическим, все же уступая им в точности, стали разработанные с запуском спутника SSM/I линейные регрессионные методы [10, 11]. Однако в последнее время благодаря растущим объемам данных и развитию технологий машинного обучения статистические методы заметно прибавили как в точности, так и надежности результатов восстановления.

Сравнительный анализ физического и статистического подходов

В настоящей работе проведен сравнительный анализ некоторых физических и статистических методов СВЧ-радиометрического восстановления влагосодержания Q и водозапаса облаков W для случая зондирования атмосферы с поверхности Земли. Для этой цели использовались данные за 2019-2023 гг., полученные в ходе эксперимента по непрерывному измерению спектров нисходящего излучения атмосферы наземным СВЧ радиометром-спектрометром «P22M» [12]. Радиометр установлен во Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, имеет 47 частотных каналов в диапазоне резонансного поглощения водяного пара 18–27.2 ГГц (шаг 200 МГц) и угловое разрешение 5–7° в зависимости от частоты. Время получения полного спектра – 11 сек. Флуктуационная чувствительность составляет 0.02 К при постоянной времени 0.3 сек. в каждом канале. Для калибровки прибора использовались специально изготовленные установки, позволяющие производить измерения излучения черного тела при комнатной температуре (горячий эталон) и при температуре кипения жидкого азота (холодный эталон). На расстоянии порядка 300 м от радиометра расположены две метеостанции, регистрирующие приповерхностные (на высоте около 15 м) значения метеорологических параметров температуры воздуха T_0 , атмосферного давления P_0 и абсолютной влажности ρ_0 с интервалом 1 мин.

Для получения референсных значений влагосодержания $Q_{p/3}$ и водозапаса W_M и с целью формирования обучающих выборок использовались данные около 3600 сеансов радиозондовых (р/з) измерений высотных профилей метеорологических параметров температуры воздуха $T_{p/3}(h)$, атмосферного давления $P_{p/3}(h)$ и абсолютной влажности $\rho_{p/3}(h)$, проведенных в период с 2019 по 2023 гг. на аэрологической станции ЦАО 27713 «Долгопрудная» [13], которая находится примерно в 30 км от места установки радиометра-спектрометра «P22M». Измерения проводятся до высоты 15 км ежедневно в 03:00 и 15:00 UTC+3. Значения $Q_{p/3}$ вычисляются прямым интегрированием измеренного высотного профиля абсолютной влажности $\rho_{p/3}(h)$. Референсные значения водозапаса рассчитываются по следующей формуле при средней эффективной температуре облака $t_{обл} = 0^\circ\text{C}$

$$W_M = \max\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\tau(v_i) - \tau^{W=0}(v_i)}{k_w^*(v_i, t_{обл})}, 0\right), \quad (1)$$

где

$$\tau^{W=0}(v_i) = \tau_o(v_i) + \tau_p(v_i) = \int_0^\infty \gamma_o(v_i, h) dh + \int_0^\infty \gamma_p(v_i, h) dh,$$

$$\tau(v_i) = [\ln(T_{cp}(v_i) - T_K) - \ln(T_{cp}(v_i) - T_{изм}^\downarrow(v_i))] \cdot \cos \theta,$$

$$T_{cp}(v_i) = T_{мод}^\downarrow(v_i) \cdot [1 - \exp(-\tau^{W=0}(v_i))]^{-1},$$

где i – порядковый номер частотного канала радиометра;

$N = 47$ – количество каналов;

v_i – частота излучения;

$\tau^{W=0}$ – модельное значение полного поглощения атмосферы в предположении отсутствия облачности;

τ_o – полное поглощение в молекулярном кислороде;

τ_p – полное поглощение в водяном паре;

γ_o и γ_p – соответственно погонные коэффициенты поглощения в кислороде и водяном паре, расчет которых производится согласно рекомендации [14] с учетом измеренных радиозондом высотных профилей метеопараметров;

k_w^* – весовая функция поглощения в облачных частицах, см. [15] и [16];

τ – оценка на полное поглощение реальной атмосферы;

$T_{\text{изм}}^{\downarrow}$ – средняя яркостная температура, регистрируемая радиометром во время проведения радиозондовых измерений (выбираются интервалы от 14:49 до 15:01 и от 02:59 до 03:01 UTC+3);

$T_{\text{ср}}$ – средняя абсолютная температура безоблачной атмосферы с учетом метеопараметров, измеренных радиозондом;

$T_K \sim 2.729$ К – температура космического фона;

$T_{\text{мод}}^{\downarrow}(v)$ – модельный спектр яркостной температуры нисходящего в надир излучения безоблачной атмосферы, полученный в результате прямого расчета известного интегрального выражения:

$$T_{\text{мод}}^{\downarrow}(v_i) = T_K \cdot e^{-\tau^{W=0}(v_i)} + \int_0^{\infty} T_{p/z}(h) \gamma(v_i, h) \cdot \exp\left(-\int_0^h \gamma(v_i, z) dz\right) dh, \quad (2)$$

где $\gamma = \gamma_0 + \gamma_p$.

На основе соответствий $(T_0, P_0, \rho_0, \{T_{\text{изм}}^{\downarrow}(v_i)\}_{i=1}^N; Q_{p/z}, W_M)$ сформируем первую обучающую выборку Ω_1 и разделим ее на непересекающиеся тренировочную Ω_1' и тестовую Ω_1'' подвыборки. Все имеющиеся данные за 2023 г. будем относить к тестовой подвыборке, остальные – к тренировочной. Дополнительно сформируем вторую выборку Ω_{II} на основе соответствий $(T_{p/z}(0), P_{p/z}(0), \rho_{p/z}(0), \{T_{\text{мод}}^{\downarrow}(v_i)\}_{i=1}^N; Q_{p/z}, W_*)$, вначале для $W_* = 0$. Путем многократного решения прямой задачи (2) уже при $\gamma = \gamma_0 + \gamma_p + \gamma_w$, где $\gamma_w = k_w(v, T_{p/z}(h)) \cdot w(h)$, а $w(h)$ – модельный профиль влажности, проведем аугментацию выборки Ω_2 , варьируя p/z профили температуры воздуха в пределах $\pm 5\%$, а профили абсолютной влажности в пределах $\pm 10\%$ от соответствующих приповерхностных значений $T_{p/z}(0)$ и $\rho_{p/z}(0)$. При этом в поле зрения наземного радиометра будем моделировать горизонтально-однородный слой сплошной облачности, вертикальная протяженность (мощность) которого постепенно увеличивается, тогда как водозапас W_* меняется от 0 кг/м² до 5 кг/м² [17]. Высотный профиль влажности $w(h)$ внутри слоя облачности будем аппроксимировать согласно [16]. Также как и с Ω_1 , разделим получившуюся выборку Ω_{II} на тренировочную и тестовую подвыборки Ω_{II}' и Ω_{II}'' , соответственно.

На рис. 1 представлены результаты восстановления влагосодержания Q дневной (15:00 UTC+3) атмосферы по данным измеренных радиометром «P22M» спектров яркостной температуры с помощью статистического (2) и трех физических методов (3), (4) и (5) в зависимости от референсного влагосодержания $Q_{p/z}$. Рассмотрены все сезоны 2023 г. Масштаб по обеим осям логарифмический. Для сравнения в верхней части (1) рис. 1 приведены значения влагосодержания Q , рассчитанные с использованием приближения стандартной атмосферы при учете регистрируемой метеостанциями приповерхностной величины абсолютной влажности ρ_0 . Здесь Q вычисляется интегрированием $\rho_0 \cdot \exp(-0,476h)$ по h от 0 до ∞ . Для быстрой визуальной оценки качества восстановления во всех частях (1)-(5) рис. 1 розовым цветом выделена область $Q_{p/z} \pm 15\%$, а черные прямые показывают результат линейной регрессии восстановленных значений Q по $Q_{p/z}$. Таким образом, наилучшим следует считать тот метод, для которого черная прямая лежит ближе к центру розовой области при минимальной дисперсии коэффициента наклона и свободного коэффициента. Также в правом нижнем углу каждой части рисунка приведено значение коэффициента корреляции Пирсона r между $Q_{p/z}$ и Q .

Из части (1) можно видеть, что приближение стандартной атмосферы дает большой разброс по Q . Такой разброс обусловлен, прежде всего, большой изменчивостью влажностного профиля атмосферы и возникает по причине отсутствия полной корреляции между высотным распределением влажности и ее приповерхностным значением.

Статистический метод из части (2) состоит в предварительном обучении на выборке Ω'_I нейросетевой модели – персептрона с 50-ю входными нейронами, четырьмя скрытыми слоями размером в 250, 100, 50 и 10 нейронов (последовательно) и выходным слоем с двумя нейронами. Таким образом, на входной слой подаются $N = 47$ значений яркостной температуры по данным «P22M», а также T_0, P_0 и ρ_0 с близлежащей метеостанции. На выходных нейронах предсказываются соответствующие значения $Q_{p/z}$ и W_M . Функция активации скрытых слоев – логистическая. Для обучения используется алгоритм стохастической оптимизации «Adam». В качестве функционала качества рассматривается среднеквадратичная ошибка. В части (2) рис. 1 в сущности показан результат работы такого предварительно обученного персептрона на данных тестовой подвыборки Ω''_I .

В части (3) изображены значения Q , полученные двухчастотным СВЧ-радиометрическим методом. Двухчастотный метод хорошо известен и представлен, например, в работе [7]. Он заключается в разрешении линеаризованной системы (3) из двух уравнений, записанных на полное поглощение, относительно неизвестных Q и W

$$\tau(v_j) = \tau_o(v_j) + k_p(v_j) \cdot Q + k_w^*(v_j, t_{обл}) \cdot W, \quad j = 1, 2, \quad (3)$$

где k_p – весовая функция поглощения в водяном паре [7, 16].

Прочие коэффициенты уже были введены в описании к формуле (1), однако, теперь их расчет производится в отсутствие данных о реальных высотных распределениях метеорологических параметров. Поскольку известны лишь приповерхностные значения T_0, P_0 и ρ_0 с метеостанции, соответствующие высотные профили приближаются моделью стандартной атмосферы аналогично части (1) рис. 1.

Двухчастотный метод можно классифицировать как физический и неоптимизационный. Некорректность рассматриваемой обратной задачи отражается здесь в плохой обусловленности матрицы коэффициентов (3). Более того, при неудачном выборе комбинации частотных каналов данная матрица оказывается близкой к вырожденной. Однако корректный выбор частот всё же позволяет контролировать число обусловленности и близость определителя системы (3) к нулю. Многочастотный метод из части (4), который следует классифицировать как физический с детерминированной оптимизацией, является естественным обобщением двухчастотного на большее количество частотных каналов и состоит в решении переопределенной системы (3) для $j = 1, \dots, N$ методом наименьших квадратов (МНК). В ходе расчетов с использованием двух- и многочастотного методов параметр $t_{обл}$ был установлен равным 0°C .

В части (5) рис. 1 представлен результат работы ещё одного предварительно обученного персептрона с 50-ю входными нейронами, двумя скрытыми слоями размером 100 и 50 нейронов и выходным слоем в 2 нейрона. Остальные параметры соответствуют первой нейросетевой модели, однако, для обучения второй используется выборка Ω''_{II} , содержащая теперь уже модельные спектры яркостной температуры нисходящего излучения облачной атмосферы. Поэтому метод, заключающийся в подготовке такого персептрона и его дальнейшем применении, следует отнести к физическим со стохастической оптимизацией.

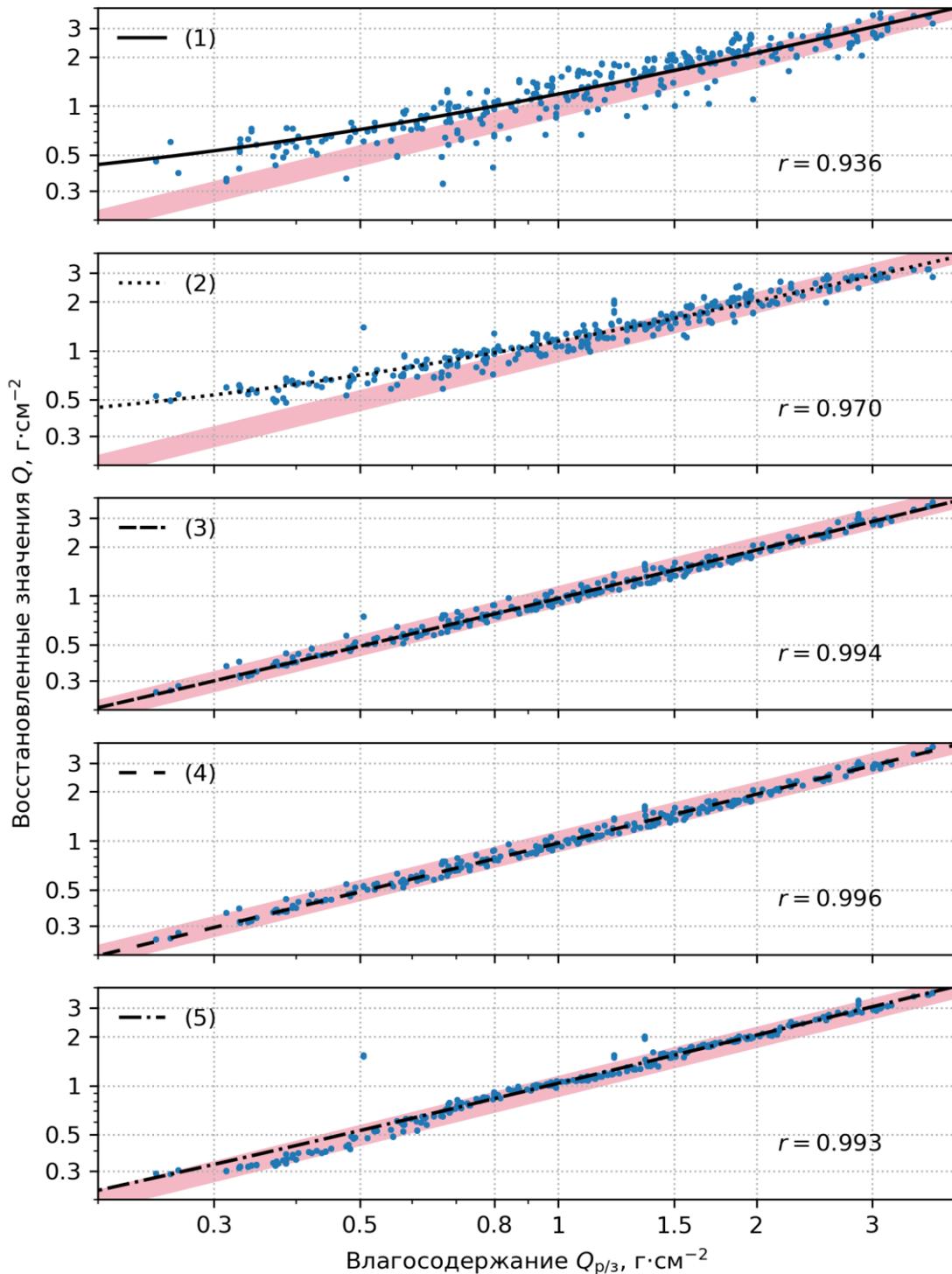


Рис. 1. Восстановленные величины влагосодержания Q в зависимости от референсных значений $Q_{p/3}$: (1) приближение стандартной атмосферы с учетом известной приповерхностной величины абсолютной влажности ρ_0 ; (2) статистический метод – обученная на подвыборке Ω'_1 нейросетевая модель; (3) двухчастотный физический метод (используются две комбинации – 18/22.2 ГГц и 22.2/27.2 ГГц, после чего найденные величины усредняются); (4) многочастотный метод как обобщение двухчастотного на основе МНК; (5) многослойный перцептрон, обученный на аугментированной подвыборке Ω'_{11} , полученной в результате многократного решения прямой задачи моделирования спектров яркостной температуры нисходящего излучения для различных состояний атмосферы. 2023 г. Логарифмический масштаб по обеим осям

Отметим, что при использовании любого из рассмотренных методов имеет место дополнительная дисперсия восстановленных значений целевого параметра Q , вызванная относительно большой пространственной разнесенностью радиометра и ближайшего пункта проведения p/z наблюдений. Истинные значения влагосодержания в месте установки радиометра, очевидно, могут отличаться от $Q_{p/z}$ в любую сторону.

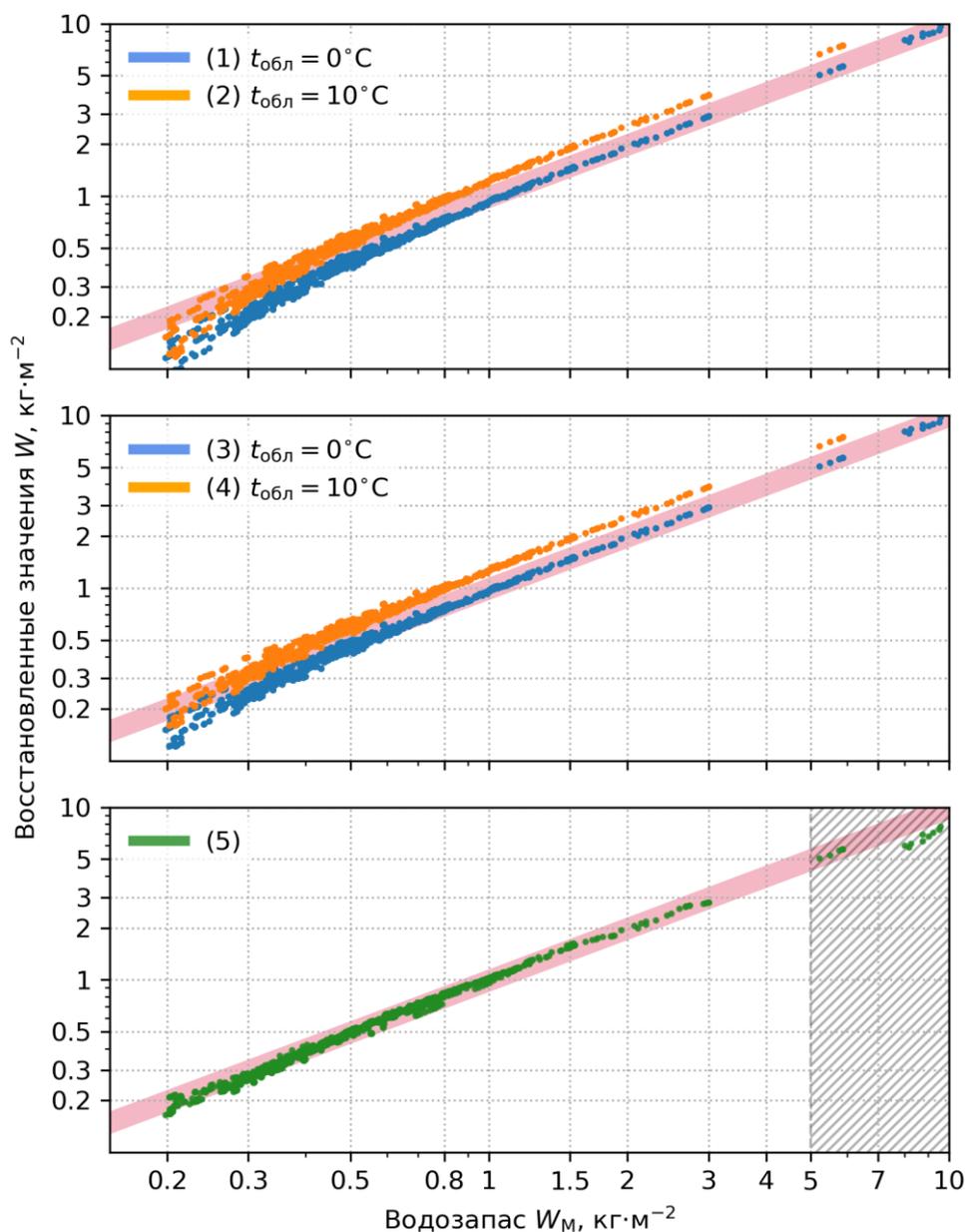


Рис. 2. Восстановленные величины водозапаса W в зависимости от референсных значений W_M : (1) и (2) – диаграммы рассеяния для двухчастотного метода (используются две комбинации – 18/22.2 ГГц и 22.2/27.2 ГГц, после чего найденные величины усредняются) при разных оценках на среднюю эффективную температуру облака $t_{обл}$; (3) и (4) – диаграммы рассеяния для многочастотного метода при разных $t_{обл}$; (5) многослойный перцептрон, обученный на подвыборке Ω'_{II} . 2023 г. Логарифмический масштаб по обеим осям

На рис. 2 в зависимости от референсных значений водозапаса W_M изображены значения водозапаса W дневной (15:00 UTC+3) атмосферы, восстановленные по данным

измеренных радиометром «P22M» спектров яркостной температуры с помощью двухчастотного (1)-(2) и многочастотного (3)-(4) методов (при разной величине параметра $t_{обл}$), а также с помощью физического метода (5) со стохастической оптимизацией, рассмотренного в части (5) рис. 1. Логарифмический масштаб по обеим осям. Отметим, что в выборке Ω'_{II} , на которой обучалась нейросетевая модель (5), отсутствуют значения водозапаса, превышающие 5 кг/м^2 .

Заключение

Выбор между физическими и статистическими методами для восстановления тех или иных параметров атмосферы (или подстилающей поверхности) зависит от требований на точность и надежность такого восстановления. Однако, несмотря на большую надежность физических методов, в некоторых случаях их использование не оправдано из-за сложности соответствующих моделей или большого числа априорных параметров, значения которых зачастую невозможно оценить с приемлемой точностью. К таким случаям можно отнести, например, определение интенсивности выпадения и других параметров жидких осадков, дождя (из-за сложности моделей переноса излучения). Спутниковое зондирование атмосферы над подстилающими поверхностями, отличными от водных, также представляет трудности количественного определения восстанавливаемых параметров, что связано с высокими значениями фонового излучения поверхностей [3, 4], зависящими от множества изменчивых в пространстве и во времени факторов.

В проведенном сравнительном анализе статистического и физических подходов на основе данных, полученных с помощью наземного радиометра-спектрометра «P22M» К-диапазона, а также данных радиозондирования за 2019-2023 гг., наилучшие результаты, тем не менее, показывают именно физические методы. Реализованный с помощью нейросетевой модели статистический подход существенно уступает физическим как в определении водозапаса, так и влагосодержания. Авторы предполагают, что это может быть связано с качеством данных о яркостной температуре за 2019-2022 гг., которые использовались для обучения модели, и различиями в калибровках.

Отметим, что при восстановлении водозапаса двух- и многочастотными методами большое значение имеет оценка на среднюю эффективную температуру облака, которая в соответствующих расчетах была принята постоянной. Переносящие небольшие количества жидкокапельной влаги облака слабой вертикальной протяженности обычно имеют более высокую среднюю эффективную температуру, чем облака с большим водозапасом. Нейросетевая модель, используемая в методе (5), оказалась способной заучить эту особенность и показала лучшую точность восстановления водозапаса при его низких значениях.

Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
2. Севастьянов А.А., Харинцев С.С., Салахов М.Х. Нейросетевая регуляризация решения обратных некорректных задач прикладной спектроскопии. // Электронный журнал «Исследовано в России». 2003. N 189. С. 2254-2266.
3. Заболотских Е.В. Современные методы определения интегральных параметров влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. N 3. С. 335-342.
4. Заболотских Е.В., Хворостовский К.С., Шапрон Б. Восстановление влагозапаса атмосферы Арктики над морским льдом по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции

- «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 2019. С. 174.
5. Башаринов А.Е., Егоров С.Т., Колосов М.А., Кутуза Б.Г. Особенности метода СВЧ радиометрического зондирования атмосферы с летательного аппарата. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1968. Вып. 222. С. 153-158.
 6. Staelin D.H. Passive remote sensing at microwave wavelengths. // Proceedings of the IEEE. 1969. V. 57. N 4. P. 427-439.
 7. Westwater E.R. The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual-frequency ground-based microwave radiometry. // Radio Science. 1978. V. 13. N 4. P. 677-685.
 8. Wilheit T., Chang A.T.C. An algorithm for retrieval of ocean surface and atmospheric parameters from the observations of the scanning multichannel microwave radiometer // Radio Science. 1980. V. 15. N 3. P. 525-544.
 9. Wentz F.J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. N C4. P. 8703-8718.
 10. Alishouse J.C., Snyder S.A., Vongsathorn J., Ferraro R.R. Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1990. V. 28. N 5. P. 811-816.
 11. Alishouse J.C., Snider J.B., Westwater E.R., Swift C.T., Ruf C.S., Snyder S.A., Vongsathorn J., Ferraro R.R. Determination of cloud liquid water content using the SSM/I // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1990. V. 28. N 5. P. 817-822.
 12. Egorov D.P., Kutuza B.G. Atmospheric brightness temperature fluctuations in the resonance absorption band of water vapor 18-27.2 GHz. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021. Vol. 59. Issue 9. P. 7627-7634.
 13. Station Number 27713. Department of Atmospheric Science. University of Wyoming. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обр. 05.05.2024).
 14. Рекомендация МСЭ-R P.676-13. Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-13-202208-I!!PDF-R.pdf (дата обр. 20.08.2023).
 15. Рекомендация МСЭ-R P.840-8. Ослабление из-за облачности и тумана. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-8-201908-I!!PDF-R.pdf (дата обр. 21.08.2023).
 16. Egorov D.P., Pyushin Ya.A., Kutuza B.G. The influence of cumuli distribution in satellite microwave radiometer FOV on the accuracy of atmospheric moisture content retrieval. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Early Access). 2024. Vol. 62. P. 1-10.
 17. Егоров Д.П., Верина Я.В., Кравченко О.В. Разработка нейросетевого метода восстановления влажностного профиля атмосферы по данным наземного микроволнового радиометра-спектрометра. // Материалы 21-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, ИКИ РАН, 2023. С. 147.