



## MULTIYEAR TRENDS IN THE TOTAL MOISTURE CONTENT OF THE TROPOSPHERE IN DIFFERENT-LATITUDE ZONES OF EASTERN SIBERIA

M.G. Dembelov <sup>1</sup>✉, Yu.B. Bashkuev <sup>1</sup>, A.V. Lukhnev <sup>2</sup>, V.A. Sankov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

**ABSTRACT.** GPS measurements are an important tool for navigation and high-precision space geodesy. Of particular importance is the use of the GPS data for determining integrated water vapor (IWV) level within the lower neutral part of the atmosphere. Radiosonde (RS) data are also important for direct determination of the integrated water vapor. The values of the weighted mean temperature ( $T_m$ ) in a vertical column are found from radiosonde launches in order to extract IWV values from GPS-derived total zenith tropospheric delay (ZTD) estimates. The total moisture content variability from 1999 to 2021 is considered based on the datasets of permanent GPS measurements, radiosondes and surface meteorology at IRKT (Irkutsk), YAKT (Yakutsk) and TIXI (Tiksi) observation points located in different-latitude zones.

The RS- and GPS-derived trends in moisture content were compared with the surface meteorological data-based model calculations. GPS measurements showed a good agreement with model calculations rather than with RS data. The tropospheric integrated water vapor tends to increase over the entire GPS observation period, and, despite a large latitudinal difference between the three observation points, there is a consolidated tendency at the level of  $0.33 \pm 0.04$  mm per decade.

**KEYWORDS:** GPS measurements; radiosondes; integrated water vapor; precipitated water; trend analysis

**FUNDING:** The study was carried out on the state assignment of the Institute of Physical Materials Science SB RAS on the research topic "Development of radiophysical methods for studying the dynamics of the surface of land, water bodies and the atmosphere of the Earth in the ELF-VLF-LF-MF and microwave ranges of radio waves" (project No. 0270-2024-0008).



EDN: GLMFJQ

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Mikhail G. Dembelov, [mdembelov@mail.ru](mailto:mdembelov@mail.ru)

Received: September 5, 2025

Revised: November 5, 2025

Accepted: November 14, 2025

**FOR CITATION:** Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., Lukhnev A.V., Sankov V.A., 2025. Multiyear Trends in the Total Moisture Content of the Troposphere in Different-Latitude Zones of Eastern Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (6), 0869. doi:10.5800/GT-2025-16-6-0869

## МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ СУММАРНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРОПОСФЕРЫ В РАЗНЫХ ШИРОТНЫХ ЗОНАХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

М.Г. Дембелов<sup>1</sup>, Ю.Б. Башкуев<sup>1</sup>, А.В. Лухнев<sup>2</sup>, В.А. Саньков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Республика Бурятия, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

**АННОТАЦИЯ.** GPS-измерения являются значимым инструментом для навигации и высокоточной космической геодезии. Важнейшим приложением по результатам обработки GPS-данных является определение уровня суммарного влагосодержания (IWV) в пределах нижней нейтральной части атмосферы. Радиозондирования (РЗ) также являются важным инструментом для непосредственного определения суммарного влагосодержания. По данным запусков радиозондов определяются значения средневзвешенной температуры ( $T_m$ ) в условном вертикальном столбе с целью извлечения значений IWV из обработанных GPS-данных по полной зенитной тропосферной задержке (ZTD). Рассмотрены изменения суммарного влагосодержания с 1999 по 2021 г. с использованием обработанных данных постоянных GPS-измерений, радиозондирований и приземной метеорологии в пунктах наблюдения IRKT (Иркутск), YAKT (Якутск) и TIXI (Тикси), расположенных в разных широтных областях.

Выполнено сравнение выявленных тенденций влагосодержания по РЗ и GPS-измерениям с расчетами по модели, учитывающей приземные метеоданные. GPS-измерения показали лучшую согласованность с модельными расчетами, чем с данными РЗ. Наблюдается тенденция к росту суммарного влагосодержания тропосферы по данным GPS-наблюдений за весь период исследования; несмотря на большие широтные отличия трех пунктов наблюдения, имеет место консолидированная тенденция на уровне  $0.33 \pm 0.04$  мм за десятилетие.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** GPS-измерения; радиозондирования; суммарный водяной пар; осаждаемая вода; анализ тренда

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование проведено в рамках госзадания Института физического материаловедения СО РАН по теме «Развитие радиофизических методов исследования динамики поверхности суши, водоемов и атмосферы Земли в СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и СВЧ диапазонах радиоволн» (проект № 0270-2024-0008).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Многие научно-технические приложения используют данные международной службы GPS (IGS) для определения точного позиционирования. Основными источниками погрешностей в GPS-геодезии являются ошибки орбиты космических аппаратов GPS и тропосферные задержки распространения сигналов [Bevis et al., 1992; Zhang et al., 2019; Nilsson, Elgered, 2008; Durre et al., 2009]. В величине полной тропосферной задержки наиболее значимую роль играет гидростатическая составляющая. Негидростатическая составляющая тропосферной задержки существенна в теплое время года, она сильно зависит от распределения водяного пара в нижней части атмосферы. Атмосферный водяной пар составляет более 60 % естественного парникового содержания и не может быть с достаточной точностью определен по поверхностным метеорологическим наблюдениям. Водяной пар постоянно циркулирует в пределах всей толщи нижней атмосферы, он испаряется на поверхности Земли и в результате конденсации образует облака, а затем возвращается на земную поверхность в виде осадков. Испарение воды в основном происходит за счет солнечного тепла, процесс конденсации воды и выпадения осадков способствует дополнительному выделению тепла в тропосфере. Вариации влагосодержания также могут быть вызваны

другими факторами изменения температуры, например изменением содержания других парниковых газов [Nilsson, Elgered, 2008; Bernet et al., 2020]. В работах [Zhang et al., 2019; Nilsson, Elgered, 2008; Durre et al., 2009; Bernet et al., 2020; Makama, Lim, 2019; Ross, Elliott, 2001; Davis et al., 1985] показана связь между изменениями массы вертикально интегрированного водяного пара и температуры. Было обнаружено, что над открытым океаном повышение температуры на 1 К приводит к увеличению IWV примерно на 5–7 % [Mears et al., 2007]. Известно, что положительные тренды IWV в глобальном масштабе проявляют себя все более явно, что в первую очередь связано с эффектом глобального потепления [Ross, Elliott, 2001; Chen, Liu, 2016]. В работе [Ross, Elliott, 2001] показаны положительные тренды IWV по радиозондовым наблюдениям на большинстве станций Северного полушария [Dembelov, Bashkuiev, 2023a].

Зенитная тропосферная задержка, определяемая в результате обработки GPS-измерений, позволяет получать значения суммарного влагосодержания в условном вертикальном столбе от земной поверхности до уровня нижней части стратосферы с достаточно высокой точностью. Регулярные GPS-измерения являются важным подходом к исследованию содержания атмосферного водяного пара с независимыми от погодных

условий наблюдениями и высоким пространственно-временным разрешением [Haase et al., 2003; Hagemann et al., 2003; Dembelov, Bashkuev, 2023a]. Качество данных PW по GPS-измерениям проверялось радиометром водяного пара в пункте BADG (Бадары), сравнения показали очень хорошее совпадение результатов [Dembelov, Bashkuev, 2022b].

На территории Восточной Сибири на протяжении около 25 лет выполняются постоянные GPS-измерения. С каждым годом количество пунктов наблюдения увеличивается. Рассматриваются три базовых пункта наблюдения, расположенных в разных широтных зонах Восточной Сибири: IRKT (52°13.35' с.ш., 104°19.12' в.д.,  $h=502$  м) – среднеширотный континентальный пункт; YAKT (62°01.87' с.ш., 129°40.84' в.д.,  $h=103$  м) – северный континентальный пункт; TIXI (71°38.24' с.ш., 128°52.14' в.д.,  $h=53$  м) – арктический пункт. Помимо задач по высокоточному позиционированию, GPS-наблюдения удобно использовать в решении задач, связанных с зондированием атмосферы. Постоянные измерения позволяют получать текущие данные о полной зенитной тропосферной задержке сигналов ZTD (м) [Nilsson, Elgered, 2008]. На приемлемом расстоянии от перечисленных GPS-станций находятся пункты запусков радиозондов. Радиозондирования позволяют определять непосредственные значения суммарного влагосодержания нижней атмосферы, а также средневзвешенные значения температуры в условном вертикальном столбе  $T_m$ .

При построении продолжительных трендов возможны случайные ошибки, которые в процессе анализа легко устранимы. Кроме того, в течение всего периода GPS-наблюдений имеют место пропуски измерений, которые замещаются моделированием с использованием приземных метеорологических данных. Чем более продолжительны по времени такие замещения, тем менее достоверными будут результаты, описывающие общую картину изменения выявленного уровня влагосодержания тропосферы. Долгосрочные тренды по радиозондовым наблюдениям могут давать заметные искажения из-за недостаточных высот зондирования, отклонений зондирования, связанных с сильным ветром, и других погрешностей измерений [Chen, Liu, 2016]. При едином заранее отработанном подходе обработки GPS-данных и последующем моделировании многолетнего ряда наблюдений можно подобные ошибки свести к минимуму и получить наиболее достоверные тренды изменения суммарного влагосодержания атмосферы [Dembelov, Bashkuev, 2023a].

## 2. ЗЕНИТНАЯ ТРОПОСФЕРНАЯ ЗАДЕРЖКА И СУММАРНОЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ

Нижняя нейтральная часть атмосферы представляет собой в основном смесь сухих газов, которые в целом описывают гидростатическую компоненту тропосферной задержки и водяного пара, который определяет «влажную» составляющую тропосферной задержки. Гидростатическая часть атмосферы однород-

на и несложна в моделировании, тогда как «влажная» часть атмосферы распределена очень неравномерно и проявляется с большой вариативностью по времени, особенно в теплый период года [Dembelov, Bashkuev, 2022b].

В связи с быстрым круговоротом воды в атмосфере и с изменением температуры в зависимости от высоты над земной поверхностью распределение водяного пара неоднородно как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Водяной пар быстро уменьшается с высотой по мере охлаждения атмосферы. Относительно уровня Мирового океана почти половина всего влагосодержания находится в атмосферном слое до высоты 2 км. Менее 5–6 % воды находится выше 5 км, а на уровне стратосферы ее количество составляет менее 1 %. Относительная влажность уменьшается с высотой примерно от 60–90 % у поверхности до 20–40 % при 300 гПа (около 9 км) [Davis et al., 1985; Abraham, Goldblatt, 2022]. ZTD может быть выражена как сумма гидростатической ZHD и «влажной» ZWD составляющих:  $ZTD=ZHD$  (расчетная)+ $ZWD$  (оценочная). Сигнал от спутника системы GPS, проходя сквозь нижнюю атмосферу, проделывает путь, который отличается от геометрического расстояния на некоторую величину  $dS$  [Dembelov, Bashkuev, 2022a]. В зенитном направлении обе компоненты задержки имеют наименьшие значения и они увеличиваются приблизительно обратно пропорционально синусу угла возвышения. При нормировании расстояния  $dS$  к зениту получается ZTD [Bevis et al., 1992]:

$$ZTD = \int_{Atm} n(h)dh - \int_{Vac} dh = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N(h)dh. \quad (1)$$

Здесь  $n(h)$  – показатель преломления, зависящий от высоты  $h$ ;  $N(h)=10^6(n(h)-1)$  – нормализованный индекс рефракции;  $h_s$  – высота расположения приемной антенны относительно уровня моря;  $dh$  – дифференциальное приращение высоты;  $Atm$  – путь луча, который фактически проходит от спутника до приемной антенны сквозь атмосферу;  $Vac$  – путь условного луча, который представляет собой геометрическое расстояние от спутника до антенны [Dembelov, Bashkuev, 2022a].

## 3. УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ZTD

Предполагается, что высотный профиль показателя преломления меняется по модели, учитывающей «сухую» и «влажную» компоненты для  $N$  [Hopfield, 1969]:

$$N(h) = N_d \left(1 - \frac{h}{h_d}\right)^4 + N_w \left(1 - \frac{h}{h_w}\right). \quad (2)$$

Здесь  $N_d=77.6p/T$  – индекс рефракции для сухого воздуха;  $N_w=373000e/T^2$  – индекс рефракции для водяного пара;  $p$  – атмосферное давление (гПа);  $T$  – температура воздуха (К);  $e$  – парциальное давление водяного пара (гПа);  $h_d=40136+148.72 \cdot t$  – эффективная

высота «сухой» компоненты (м), где  $t$  – температура воздуха (°C) [Hopfield, 1969];  $h_w$  – максимальная высота для «влажной» компоненты (м). Для всех рассматриваемых пунктов наблюдения примем высоту  $h_w=11$  км [Dembelov, Bashkuev, 2022a].

Подставив формулу (2) в формулу (1) и выполнив интегрирование, получим формулы для расчета значений ZHD и ZWD по приземным метеорологическим данным [Dembelov, Bashkuev, 2022a]:

$$ZHD = 0.0023p - 0.00497 \frac{p}{T}, \tag{3}$$

$$ZWD = 821.16 \frac{e}{T^2}. \tag{4}$$

Формулы для определения зенитной тропосферной задержки сигналов (3) и (4) являются упрощенным вариантом формулы Хопфильд [Hopfield, 1969]. Для рассматриваемых пунктов наблюдения IRKT, YAKT и TIXI (рис. 1) выполнены сравнительные расчеты ZTD по формулам (3) и (4) и по известным формулам Саастамойнена [Saastamoinen, 1972] с использованием метеорологических данных за весь 2021 г. Среднее отклонение разности расчетов было не более 0.0018 м, коэффициент кросс-корреляции между результатами расчетов был на уровне 0.98. Такая высокая точность подтверждает, что формулы (3) и (4) для расчета ZHD и ZWD с использованием приземных метеорологических данных, наряду с формулами Саастамойнена, яв-

ляются приемлемыми для моделирования тропосферных задержек.

#### 4. СУММАРНОЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ

В результате обработки GPS-данных программой GAMIT [King, Bock, 2000], помимо результатов по высокоточному позиционированию, выдается ZTD и ее горизонтальные градиенты в виде отдельных файлов в универсальном формате. Сравнение данных ZTD, полученных в результате GPS-измерений, с данными, рассчитанными по формулам (3) и (4), показало хорошее совпадение [Dembelov, Bashkuev, 2023b]. Суммарное влагосодержание IWV в тропосфере в условном вертикальном столбе с единичной площадью поперечного сечения  $1 \times 1$  м пропорционально значению влажной составляющей ZWD [Lukhneva et al., 2016]. Значения ZWD по GPS-наблюдениям получают вычитанием рассчитанных по формуле (3) значений ZHD из измеренных значений ZTD. Осаждаемая вода PW (м) определяется в виде колонки жидкой воды. Имеет место соотношение  $PW=IWV/\rho$ , где  $\rho$  – плотность жидкой воды ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Зачастую уровень влагосодержания описывается параметром PW.

Суммарное влагосодержание тропосферы IWV определяется над пунктом наблюдения по данным ZWD по формуле [Lukhneva et al., 2016; Dembelov, Bashkuev, 2022b]:

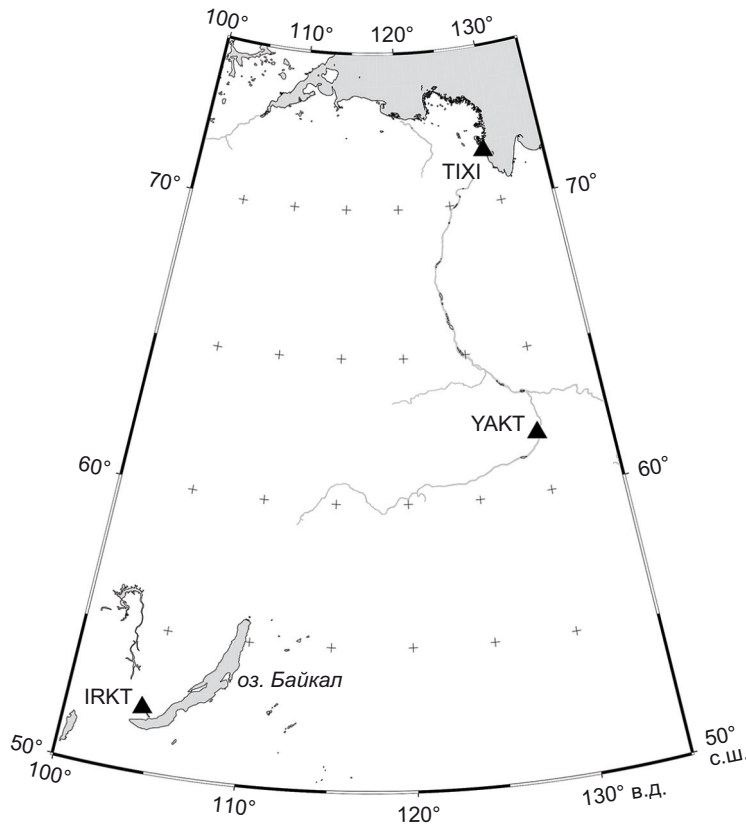


Рис. 1. Схема расположения пунктов GPS-наблюдения IRKT, YAKT и TIXI на территории Восточной Сибири.  
 Fig. 1. Schematic diagram of the GPS observation points (IRKT, YAKT and TIXI) location in Eastern Siberia.

$$IWV = 10^6 \frac{T_m}{k_2 R_w} ZWD, \tag{5}$$

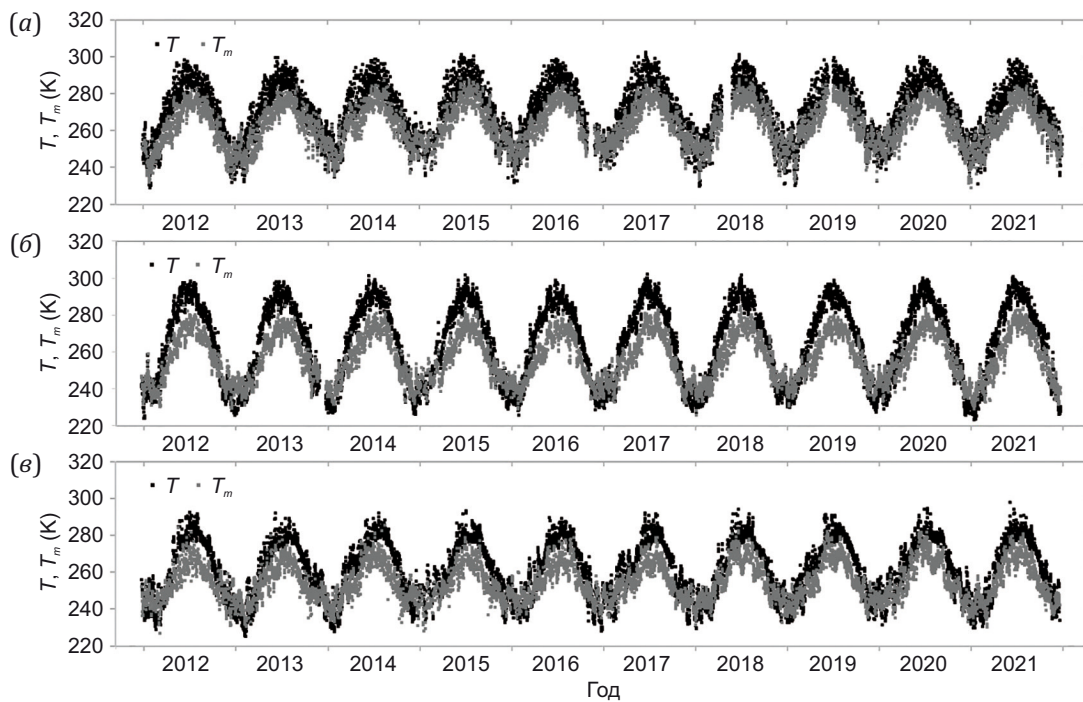
где  $k_2$  – вторая постоянная преломления ( $K^2/гПа$ ) [Davis et al., 1985];  $R_w$  – газовая постоянная для водяного пара ( $Дж \cdot K^{-1} \cdot г^{-1}$ ) [Lukhneva et al., 2016];  $T_m$  – «средневзвешенная» температура по упругости водяного пара в вертикальном столбе над точкой приема (К). Параметр  $T_m$  определяется отношением интегралов [Bevis et al., 1992]:

$$T_m = \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T} dh / \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh. \tag{6}$$

### 5. ТОЧНОСТЬ МОДЕЛЕЙ $T_m$

Средневзвешенная температура атмосферы ( $T_m$ ) является ключевым параметром, используемым для расчета осаждаемого водяного пара PW по измеренным значениям ZWD [Ma et al., 2022]. Для выявления моделей  $T_m$  для каждого пункта наблюдения использовались данные РЗ в пунктах аэрологии Росгидромета –

Ангарск, Якутск и Тикси. Эти пункты РЗ расположены на допустимом для анализа расстоянии от соответствующих GPS-пунктов [Haase et al., 2003]. Данные РЗ извлекаются из набора данных веб-сайта Университета штата Вайоминг (США), где предлагается удобный способ доступа и загрузки глобальных данных радиозондирований. Данные РЗ содержат необходимые вертикальные профили метеорологических параметров (атмосферное давление, температура и давление водяного пара), как правило, с временным периодом два раза в сутки. В большинстве случаев пункты GPS-наблюдений и пункты РЗ не совпадают по месторасположению. Для целей сопоставления данных удаление до 50 км является вполне приемлемым [Haase et al., 2003]. Пункт РЗ Ангарск расположен на расстоянии около 42 км от пункта IRKT. Разность по высоте пунктов наблюдения не превышает 60 м. Пункты РЗ в Якутске и Тикси расположены не дальше 6 км от пунктов GPS-наблюдений YAKT и TIXI соответственно. Разность по высоте расположения над уровнем моря не превышает 40 м [Dembelov, Bashkuev, 2023b].



**Рис. 2.** Сравнение временных рядов  $T$  и  $T_m$ , полученных с помощью RS, для трех станций – IRKT (а), YAKT (б) и TIXI (в) за период с 2012 по 2021 г.

**Fig. 2.** Comparison of RS-derived  $T$  and  $T_m$  time series for IRKT (a), YAKT (b) and TIXI (c) over the period from 2012 to 2021.

**Таблица 1.**  $T - T_m$  сравнение

**Table 1.**  $T - T_m$  comparison

Пункт радиозондирования	Среднее отклонение (К)	СКО (К)	Коэффициент корреляции
Ангарск (30715)	5.56	6.8	0.92
Якутск (24959)	9.09	10.6	0.93
Тикси (21824)	6.86	8.48	0.87

На рис. 2 показаны изменения значений приземной температуры  $T$  и средневзвешенной температуры  $T_m$ , рассчитанной по формуле (6), для трех рассматриваемых пунктов наблюдения с 2012 по 2021 г. Сравнение разницы значений  $T - T_m$  представлено в табл. 1. Средние отклонения и среднеквадратические отклонения (СКО) существенно зависят от годовых температурных максимумов и минимумов [Dembelov, Bashkuev, 2023b]. Пункт РЗ Тикси расположен непосредственно на берегу Северного Ледовитого океана (рис. 3), и он постоянно подвержен арктическим ветрам, поэтому радиозонды часто значительно отклоняются от зенитного направления относительно пункта запуска. С этим связана не настолько высокая корреляция между  $T$  и  $T_m$ .

На рис. 4 показаны соотношения  $T$  и  $T_m$  для пункта РЗ Ангарск за 10-летний (6957 измерений) и 23-летний

(13613 измерений) периоды. Как видно из рис. 4, выявленные линейные регрессии оказались очень близки ( $T_m = 0.688 \cdot T + 77.1$  и  $T_m = 0.687 \cdot T + 76.9$ ), поэтому для определения IWV по формуле (5) достаточно учитывать регрессию для  $T_m$  за 10-летний срок.

На рис. 5 представлены соотношения  $T_m$  и  $T$  для пунктов Якутск и Тикси за 10-летний период с 2012 по 2021 г. Соотношение между  $T_m$  и  $T$  можно аппроксимировать регрессией в виде линейной и степенной функции. Рис. 5 демонстрирует, что квадратичная функция более точно выражает связь между двумя параметрами [Li et al., 2022]. Для Якутска средние отклонения значений  $T_m$ , полученных по формуле (6), от аппроксимаций линейной и квадратичной регрессий равны соответственно 3.76 и 3.45 К. Аналогично для Тикси – 4.16 и 3.83 К соответственно [Dembelov, Bashkuev, 2023b].



Рис. 3. Пункт запусков радиозондов «Тикси», местность Полярка (71°35.2' с.ш., 128°55.5' в.д.).

Fig. 3. "Tiksi" point of radiosonde launch, Polyarka locality (71°35.2' N, 128°55.5' E).

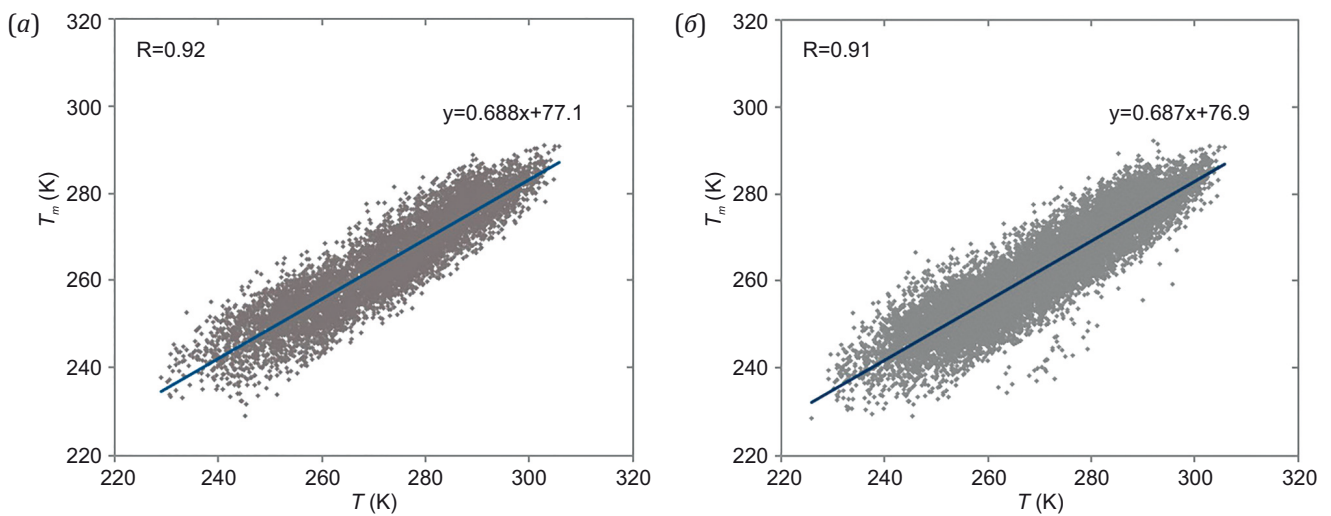
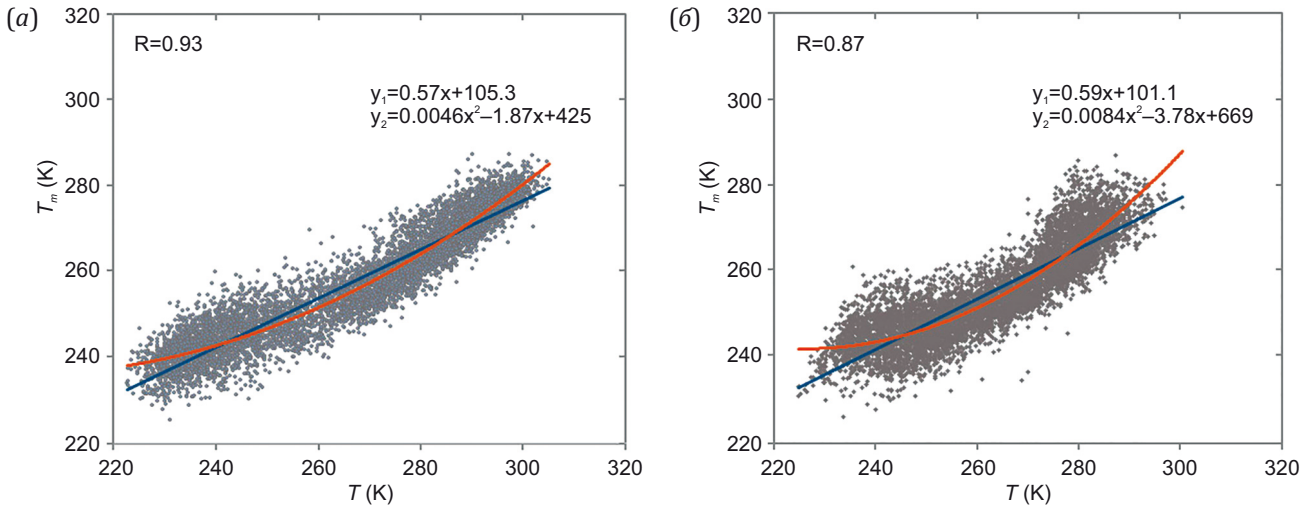


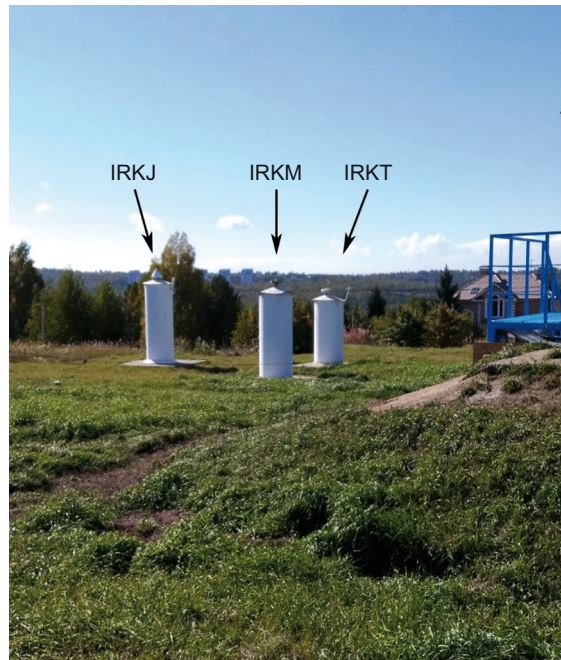
Рис. 4. Соотношения  $T$  и  $T_m$ , выявленные по данным метеорологических зондирований над г. Ангарском за 2012–2021 г. (а) и 1999–2021 г. (б).

Fig. 4. The ratios of  $T$  and  $T_m$  obtained based on meteorological soundings over the city of Angarsk in 2012–2021 (a) and 1999–2021 (b).



**Рис. 5.** Соотношения  $T$  и  $T_m$ , полученные по данным метеорологических зондирований за 2012–2021 г. над г. Якутском (а) и п. Тикси (б).

**Fig. 5.** Ratios of  $T$  and  $T_m$  obtained from meteorological soundings over Yakutsk (a) and Tiksi (b) in 2012 – 2021.



**Рис. 6.** Антенны пунктов постоянных GPS-наблюдений IRKT, IRKM и IRKJ на полигоне ВСФ ВНИИФТРИ (г. Иркутск).

**Fig. 6.** Antennas of IRKT, IRKM and IRKJ permanent GPS observation points at the VSF VNIIFTRI testing ground (Irkutsk).

**6. СРАВНЕНИЕ PW, ПОЛУЧЕННЫХ ПО GPS-ИЗМЕРЕНИЯМ И РАДИОЗОНДИРОВАНИЯМ**

Помимо программного пакета GAMIT, используется метод GNSS-позиционирования PPP (Precise Point Positioning) [Kalinnikov, Khutorova, 2019; Jiang et al., 2020], который позволяет одним двухчастотным GPS-приемником достичь точности определения координат в пределах нескольких сантиметров. На основе метода PPP-обработки первичных данных реализуются вспомогательные программы и онлайн сервисы для получения данных по тропосферной задержке сигналов GPS. Для этого используются точные эфемериды, пре-

доставляемые пользователям несколькими национальными и международными организациями, при этом не используется корректирующая информация сетей постоянно действующих базовых станций. Необходимо отметить, что по 2020 г. включительно оба метода давали очень близкие результаты по тропосферной задержке. Но с 2021 г. для обработки GPS-данных используется обновленная версия GAMIT, в которую по умолчанию включены новые утилиты по атмосферной задержке.

Приемные антенны пунктов GPS-наблюдения IRKT, IRKM и IRKJ установлены в одном месте в г. Иркутске на

территории ВСФ ВНИИФТРИ (рис. 6), поэтому получаемые значения тропосферных задержек в этих трех пунктах абсолютно идентичны и взаимозаменяемы.

На рис. 7 приведено сравнение результатов по ZTD, полученных при обработке первичных данных по программе GAMIT и по методу PPP для пункта IRKJ за 2021 г. Наблюдается высокий уровень взаимной корреляции полученных графиков, при этом за исключением летнего периода имеет место значительное отклонение результатов, получаемых при обработке программой

GAMIT. Сравнение полученных данных в течение июля 2021 г. показало взаимную корреляцию не хуже 0.98 и среднее отличие в пределах 0.56 %. Значения ZTD за весь 2021 г. определялись на основе метода PPP.

Радиозондирования являются инструментом непосредственных наблюдений за уровнем влагосодержания тропосферы, поэтому они представляют собой источник независимых данных для проверки качества обработанных данных по PW, полученных по GPS-наблюдениям. Постоянный пункт GPS-наблюдений ANGR

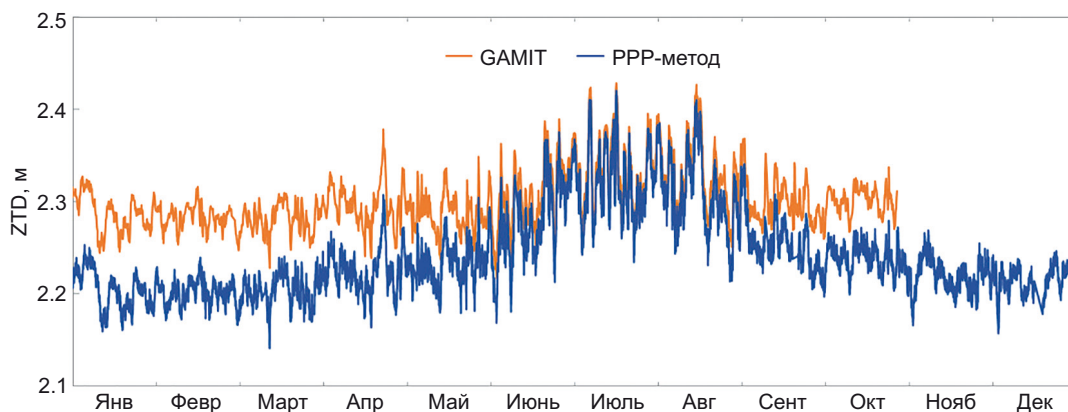


Рис. 7. Сравнение полученных данных ZTD в результате обработки программным пакетом GAMIT и приложением на основе PPP-метода для пункта IRKJ за 2021 г.

Fig. 7. Comparison between GAMIT-derived and PPP-based ZTD data for IRKJ point in 2021.

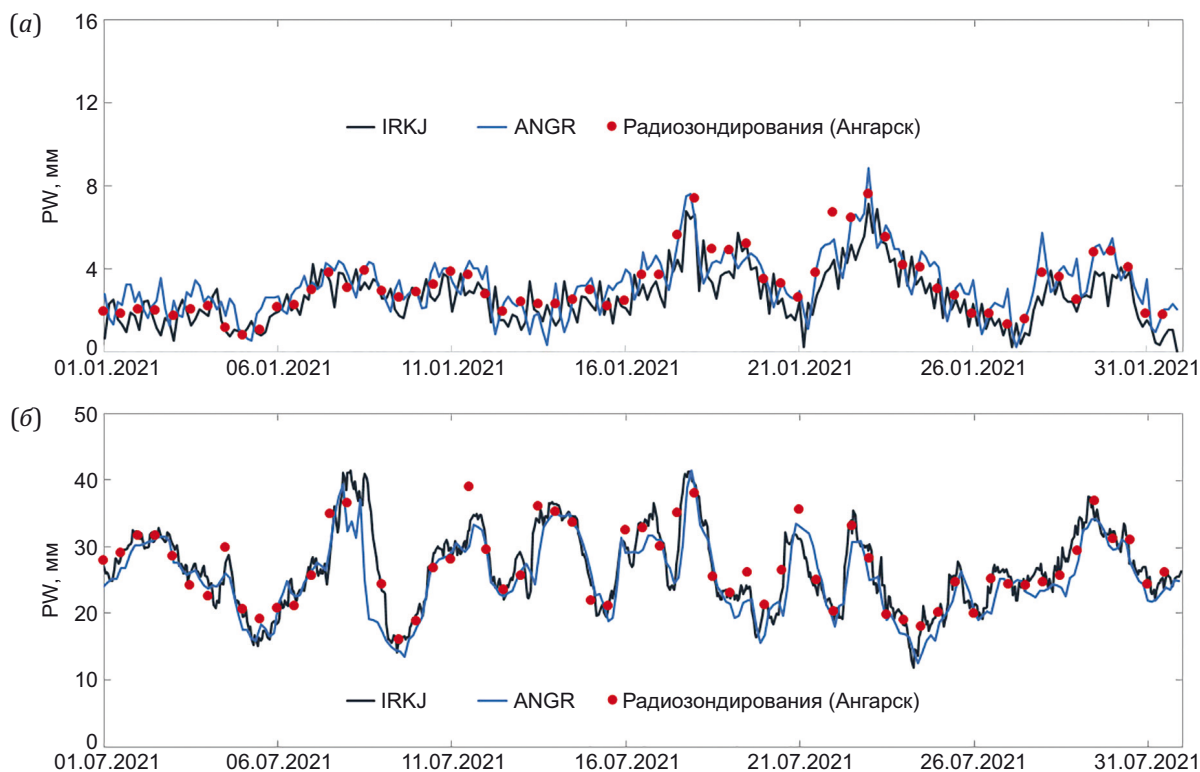
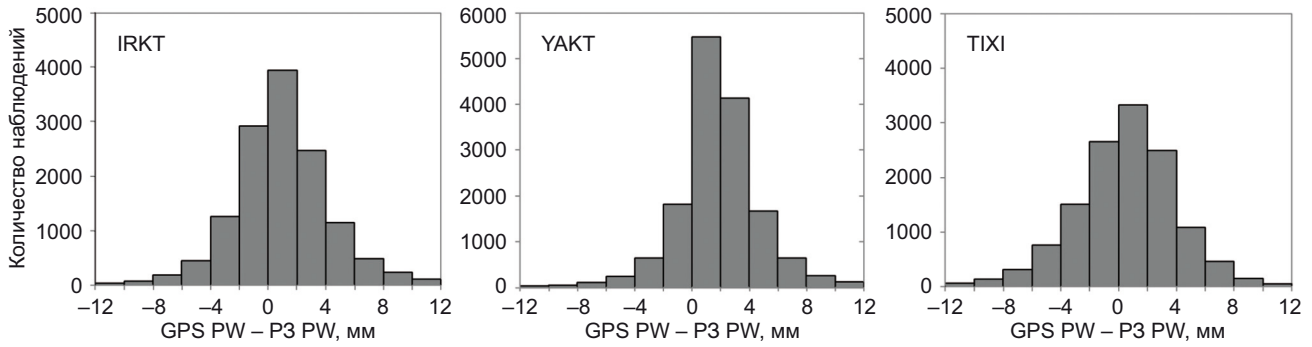


Рис. 8. Сравнительные графики влагосодержания тропосферы по данным GPS-измерений в пунктах IRKJ и ANGR и радиозондирований (г. Ангарск) за январь (а) и июль (б) 2021 г.

Fig. 8. Graphs for comparing tropospheric moisture contents based on GPS measurements at IRKJ and ANGR points and radiosoundings (Angarsk) for January (a) and July (b) of 2021.



**Рис. 9.** Гистограммы невязок GPS PW – P3 PW для пунктов IRKT, YAKT и TIXI за 2012–2021 г.  
**Fig. 9.** Histograms of GPS PW – RS PW residuals for IRKT, YAKT and TIXI points over 2012–2021.

запущен в 2021 г. Он расположен на расстоянии 1.7 км от места запусков радиозондов Ангарск. На **рис. 8** представлены сравнительные графики изменения уровня влагосодержания PW, которые определены по GPS-наблюдениям в пунктах IRKJ и ANGR и по данным P3 над г. Ангарском за январь и июль 2021 г. За период с 1 по 31 января коэффициент взаимной корреляции между значениями PW по GPS-наблюдениям в обоих пунктах и P3 оказался практически одинаковым ( $K=0.91$ ), причем среднее отклонение разницы наблюдений в пунктах IRKJ и P3 (Ангарск) оказалось немного меньше разницы в пунктах ANGR и P3 (Ангарск), соответственно 0.63 и 0.65 мм. В течение июля, когда влагосодержание тропосферы характеризуется максимальными значениями, среднее отклонение разницы наблюдений в пунктах IRKJ и P3 (Ангарск) соответствовало 2.03 мм, а в пунктах ANGR и P3 (Ангарск) – 1.86 мм. Сравнения с радиозондированиями показывают, что среднее отклонение в январе относительно средних значений в пункте ANGR около 14 %, а в пункте IRKJ – порядка 18 %. Аналогичные сравнения для июля в пункте ANGR оказались в пределах 8 %, а в пункте IRKJ равны 7 %.

На **рис. 9** представлены гистограммы разницы GPS PW – P3 PW для трех пунктов наблюдения – IRKT, YAKT и TIXI за десятилетний период наблюдений. Для пункта IRKT использована линейная регрессия  $T_m = 77 + 0.69 \cdot T$  (см. **рис. 4**) для расчета IWV по формуле (5). Для пунктов YAKT и TIXI использованы квадратичные регрессии соответственно  $T_m = 425 - 1.87 \cdot T + 0.0046 \cdot T^2$  и  $T_m = 669 - 3.78 \cdot T + 0.0084 \cdot T^2$  (см. **рис. 5**). Для пункта IRKT в интервал  $\pm 4$  мм попадает 78 % результатов разницы GPS PW – P3 PW, аналогично для пункта YAKT попадает 77 %, для TIXI попадает 75 %.

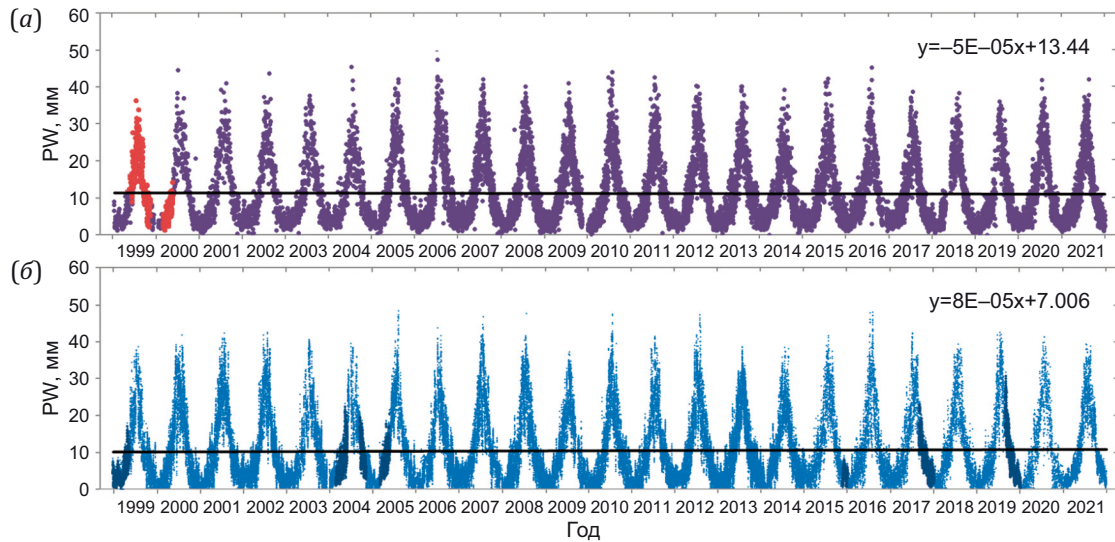
**7. СРАВНЕНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ТРЕНДОВ PW ПО ДАННЫМ P3, МЕТЕОРОЛОГИИ И GPS**

Рассмотрены многолетние изменения значений суммарного влагосодержания в виде осаждаемой воды PW по набору данных GPS-наблюдений и P3. В рядах наблюдений отсутствующие данные по GPS-измерениям и P3 заполнялись значениями PW по метеоданным с использованием формул (4) и (5). Для пункта IRKT доля заполненных значений PW по метеорологическим

данным не превысила 5 % в ряду по P3 и 7 % в ряду по GPS-наблюдениям. В пунктах YAKT и TIXI соответствующие показатели составили: по P3 – 0 и 6 %, по GPS-наблюдениям – 9 и 8 %. На **рис. 10** представлены 23-летние изменения PW, полученные по данным P3 (**рис. 10, а**) и в результате обработки GPS-данных (**рис. 10, б**) для пункта наблюдения IRKT. Во временном ряду по P3 рассчитанные значения PW на основе метеоданных выделены красным цветом. Аналогично, во временном ряду по GPS-измерениям значения PW, полученные с использованием метеоданных, отображены темно-синим цветом. На **рис. 11** и **12** представлены аналогичные 23-летние изменения PW по P3 и GPS-наблюдениям для пунктов наблюдения YAKT и TIXI. Черные линии показывают общий тренд изменения PW за весь 23-летний срок наблюдений.

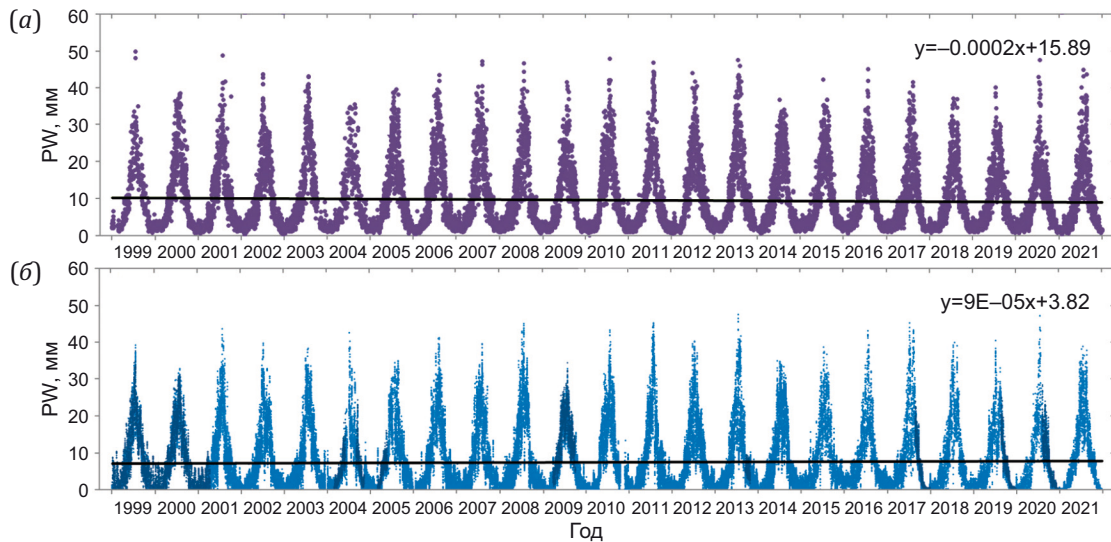
Как видно из **рис. 10** и **11**, в пунктах IRKT и YAKT наблюдаются отрицательные тренды PW по данным запусков радиозондов на уровне  $-0.14$  мм и  $-0.73$  мм за десятилетие соответственно. В то же время GPS-измерения в этих двух пунктах показывают положительные тренды на уровне  $+0.32$  и  $+0.33$  мм за десятилетие соответственно. Разнонаправленные результаты десятилетних трендов PW по P3 и GPS-наблюдениям в первую очередь объясняются редкими радиозондовыми наблюдениями (не чаще двух раз в сутки), а также учетом всех запусков радиозондов, в том числе с недостаточной максимальной высотой зондирования. GPS-измерения же рассматриваются через каждые три часа [Dembelov et al., 2023]. Для пунктов IRKT и YAKT, расположенных в континентальной зоне с большими амплитудами годовых и суточных температурных колебаний, для большей достоверности результатов требуются более частые наблюдения. Необходимо отметить, что в данных условиях определение трендов многолетнего изменения суммарного влагосодержания тропосферы по результатам радиозондирования является некорректным.

Приземная температура в обоих пунктах имеет положительную тенденцию изменения за десятилетие ( $+0.36$  К в пункте IRKT и  $+0.72$  К в пункте YAKT). В приарктическом пункте TIXI наблюдаются положительные тренды как по P3 ( $+0.33$  мм за десятилетие),



**Рис. 10.** Временной ряд измеренных значений PW в пункте наблюдения IRKT за период 1999–2021 гг. по данным РЗ (а) и по GPS-измерениям (б). Черная линия показывает общий тренд за 23 года.

**Fig. 10.** Time series of RS-based (a) and GPS-based (б) PW values at IRKT observation point for the period 1999–2021. The black line shows a general trend over 23 years.



**Рис. 11.** Временной ряд измеренных значений PW в пункте наблюдения YAKT за период 1999–2021 гг. по данным РЗ (а) и по GPS-измерениям (б). Черная линия является общим трендом за 23 года.

**Fig. 11.** Time series of RS-based (a) and GPS-based (б) PW values at YAKT observation point for the period 1999–2021. The black line shows a general trend over 23 years.

**Таблица 2.** Изменения PW (мм за десятилетие) по данным РЗ и GPS-наблюдениям, а также изменения приземной температуры (К за десятилетие) в пунктах IRKT, YAKT и TIXI

**Table 2.** Changes in RS- and GPS-based PW values (mm per decade) and in surface temperature (K per decade) at IRKT, YAKT and TIXI points

Пункт наблюдения	Изменение PW (мм) по данным РЗ	Изменение PW (мм) по GPS-данным	Изменение приземной температуры (К)
IRKT	-0.14	+0.32	+0.36
YAKT	-0.73	+0.33	+0.72
TIXI	+0.33	+0.36	+1.1

так и по GPS-наблюдениям (+0.36 мм за десятилетие) [Dembelov et al., 2023]. За эти же 23 года наблюдений приземная температура за десятилетие изменялась с трендом +1.1 К. В табл. 2 представлены рассматриваемые десятилетние тренды в указанных пунктах

наблюдения. Как видно из табл. 2, десятилетние тренды PW по GPS-измерениям в трех пунктах наблюдения показывают довольно близкие положительные значения, тогда как десятилетние тренды приземной температуры воздуха в этих же пунктах значительно

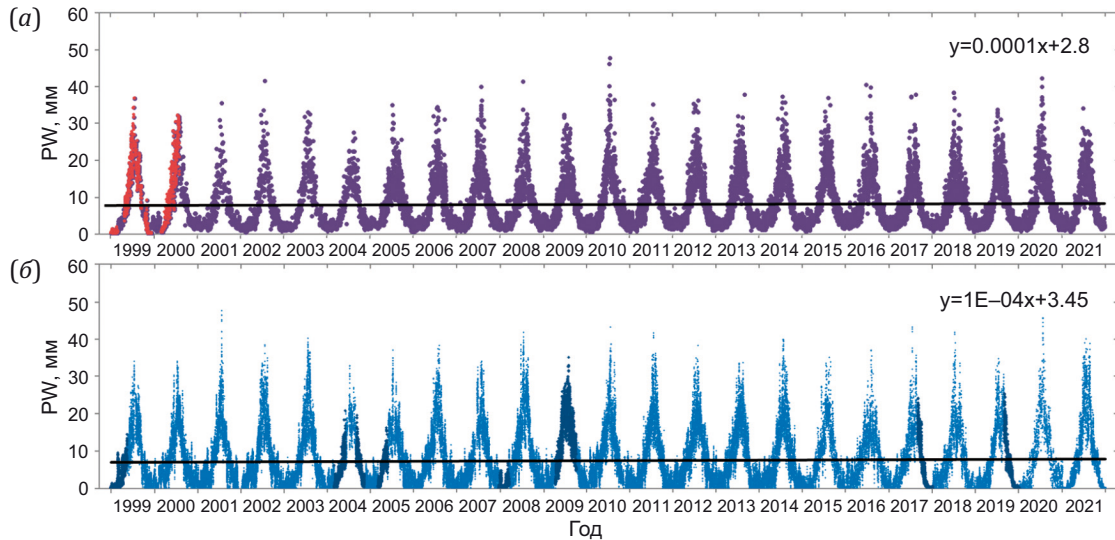


Рис. 12. Временной ряд измеренных значений PW в пункте наблюдения TIXI за период 1999–2021 гг. по данным РЗ (а) и по GPS-измерениям (б). Черная линия является общим трендом за 23 года.

Fig. 12. Time series of RS-based (a) and GPS-based (b) PW values at TIXI observation point for the period 1999–2021. The black line shows a general trend over 23 years.

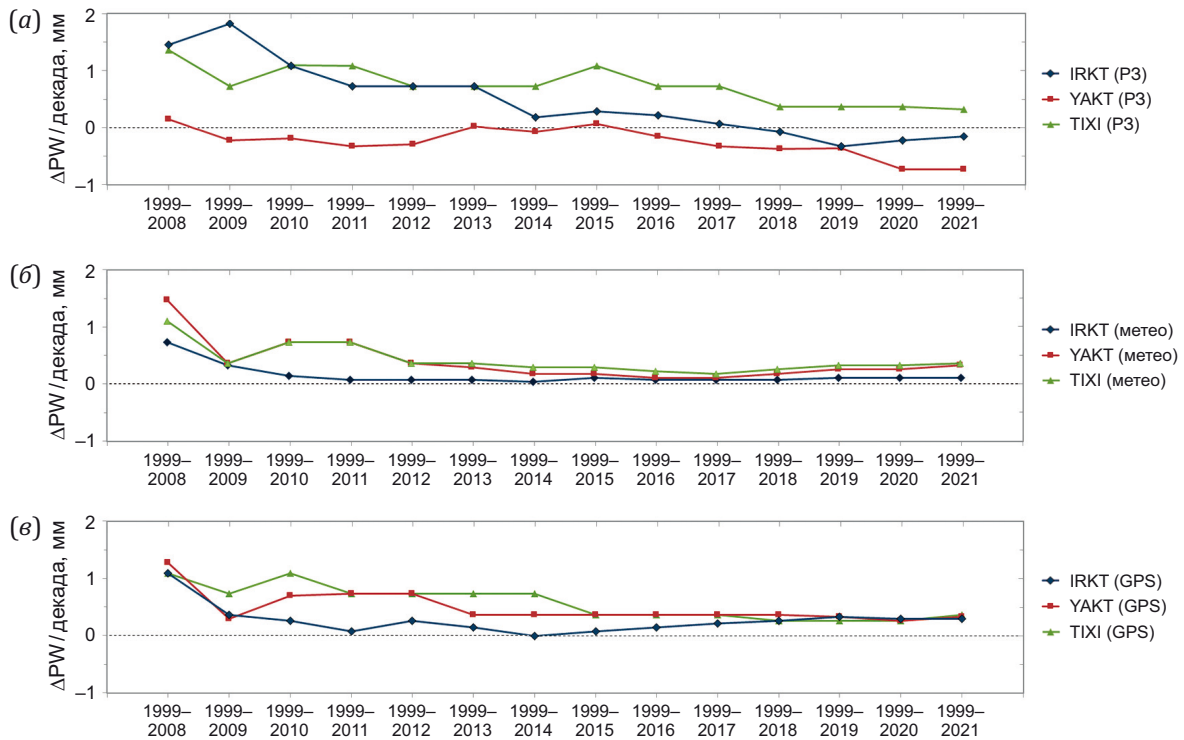


Рис. 13. Графики изменения скорости трендов за десятилетие  $\Delta PW$ , учитывающие временные ряды от 1999–2008 (10 лет) до 1999–2021 гг. (23 года). Рассматриваются изменения трендов, полученных по РЗ (а); по приземной метеорологии (б); по GPS-измерениям (в).

Fig. 13. Graphs of trend velocities per decade  $\Delta PW$  taking into account time series from 1999–2008 (10 years) to 1999–2021 (23 years). Consideration is being given to RS-based (a), surface meteorology-based (b) and GPS-based (c) trend velocities.

увеличиваются по мере увеличения географической широты.

В работах [Chen, Liu, 2016; Wang et al., 2016] отмечалось, что изменение суммарного влагосодержания тропосферы не везде коррелирует с изменением температуры, существуют заметные региональные различия. Во внутриконтинентальных районах корреляция между изменениями PW и приземной температурой меньше, чем над океанами. В некоторых регионах даже отмечаются противоположные тенденции [Wagner et al., 2006]. Значительные изменения PW и приземной температуры в последние годы, показанные в табл. 2, больше связаны с поведением самого водяного пара. Водяной пар гораздо больше других парниковых газов поглощает инфракрасной энергии, которая поступает от земной поверхности. Увеличение содержания водяного пара в атмосфере усиливает потепление, вызванное также другими парниковыми газами. Он поглощает тепло, исходящее от земной поверхности, и задерживает его выход в открытое пространство. Это больше увеличивает нагрев атмосферы, что приводит к еще большему влагосодержанию в атмосфере. Это явление известно как эффект «положительной обратной связи» [Zhou et al., 2023].

Значительное увеличение суммарного влагосодержания тропосферы по данным PЗ и GPS-наблюдений над пунктом ТИХИ несомненно связано с процессом ускоренного потепления Арктики. Увеличение влагосодержания в атмосфере подтверждает роль местного испарения в усилении арктического гидрологического цикла при потеплении климата, а не притока водяного пара в Арктику извне. В целом, полученные тренды PW и приземной температуры показывают усиление процесса глобального потепления в Арктической зоне.

В рис. 13 отражены десятилетние изменения скорости трендов суммарного влагосодержания ( $\Delta PW$ ). Рассмотрены временные интервалы от 10 (1999–2008 гг.) до 23 лет (1999–2021 гг.). Для каждого пункта наблюдения рассмотрены изменения тренда  $\Delta PW$  по PЗ наблюдениям, приземной метеорологии (meteo PW) и GPS-измерениям. Приземная метеорология подразумевает расчет PW с использованием формул (4) и (5). Наблюдается хорошая консолидация графиков по метеорологической модели и GPS-измерениям, когда учитываются более продолжительные тренды. Тренды по GPS-измерениям за 1999–2019, 1999–2020 и 1999–2021 гг. по всем трем пунктам показали фактически одинаковое значение на уровне  $0.34 \pm 0.02$  мм за десятилетие [Dembelov, Bashkuev, 2023a]. Для пункта IRKT среднее отклонение разницы GPS PW – meteo PW составило 0.15 мм; разницы PЗ PW – meteo PW составило 0.37 мм. Для пункта YAKT среднее отклонение составило соответственно 0.23 и 0.33 мм, для пункта ТИХИ 0.24 и 0.29 мм соответственно. Таким образом, регулярные GPS-измерения дают наиболее устойчивый многолетний тренд суммарного влагосодержания нижней атмосферы.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения уровня влагосодержания по набору данных GPS-измерений выявлялись линейные и квадратичные эмпирические модели для  $T_m$  по результатам радиозондирований в пунктах аэрологии Росгидромета вблизи рассматриваемых пунктов наблюдения IRKT, YAKT и ТИХИ. Показано, что для YAKT и ТИХИ квадратичная модель лучше описывает связь между приземной температурой  $T$  и средневзвешенной  $T_m$ .

Построены 23-летние ряды суммарного влагосодержания атмосферы на основе данных радиозондирований и GPS-измерений для пунктов IRKT, YAKT и ТИХИ. За период 1999–2021 гг. рассмотренные тренды PW, оцененные на основе PЗ, для IRKT и YAKT оказались отрицательными,  $-0.14$  и  $-0.73$  мм за десятилетие. Многолетние GPS-измерения в этих двух пунктах показали положительные тренды на уровне  $+0.32$  и  $+0.33$  мм за десятилетие соответственно. В приарктическом пункте ТИХИ обнаружены положительные изменения PW как по PЗ ( $+0.33$  мм за десятилетие), так и по GPS-наблюдениям ( $+0.36$  мм за десятилетие) [Dembelov, Bashkuev, 2023b]. Изменения приземной температуры воздуха в трех пунктах демонстрируют существенный рост с юга на север ( $+0.36$  К в пункте IRKT,  $+0.72$  К в YAKT и  $+1.1$  К в ТИХИ). Радиозондирования, помимо того, что они выполняются всего лишь два раза в сутки, имеют некоторые недостатки, которые могут заметно влиять на качество получаемых данных [Haase et al., 2003], поэтому GPS-измерения показали наиболее достоверные 23-летние изменения влагосодержания тропосферы в трех выбранных пунктах наблюдения.

Суммарное влагосодержание в атмосферном воздухе постоянно меняется и в основном зависит от температуры воздуха и от солнечной радиации, которая необходима в процессе испарения воды с земной поверхности. Существенные увеличения PW и приземной температуры в трех пунктах наблюдения (табл. 2) подтверждают активное проявление эффекта «положительной обратной связи» в последние годы. Особенно сильно это наблюдается в пункте наблюдения ТИХИ, где проявляется процесс ускоренного потепления Арктики.

Рассмотренные временные ряды: с 1999–2008 (10 лет) до 1999–2021 гг. (23 года) для каждого пункта наблюдения по GPS-измерениям показали консолидированное значение на уровне  $0.34 \pm 0.02$  мм за десятилетие. Хотя за те же 23 года рассмотрения изменения средней приземной температуры за десятилетие заметно отличались и составили  $+0.36$  К для IRKM;  $+0.72$  К для YAKT и  $+1.1$  К для ТИХИ. Связь изменения PW от изменения температуры проявлялась по GPS-наблюдениям, но по PЗ подобная зависимость отсутствовала.

Таким образом, выполненное исследование, основанное на анализе данных GPS-наблюдений и радиозондирований, позволяет сделать вывод о существенных положительных трендах влагосодержания тропосферы в различных широтных зонах Восточной

Сибири. В ходе работы были построены длинные временные ряды PW, что позволило выявить как устойчивые тенденции (в частности, по GPS-данным), так и методологические ограничения радиозондов, связанные с частотой запусков, высотной дискретностью, отклонениями по расстоянию, запаздыванием отсчетов и другое.

Интеграция регулярных GPS-наблюдений с метеорологическими и радиозондовыми данными создает надежную основу для удовлетворительного по точности моделирования атмосферных процессов и анализа региональных последствий глобального потепления.

## 9. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научному сотруднику Казанского федерального университета В.В. Калининскому за предоставленную возможность расчетов полной зенитной тропосферной задержки по данным GPS-измерений методом PPP.

## 10. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД

### АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 11. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 12. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abraham C., Goldblatt C., 2022. A Satellite Climatology of Relative Humidity Profiles and Outgoing Thermal Radiation over Earth's Oceans. *Journal of the Atmospheric Sciences* 79 (9), 2243–2265. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-21-0270.1>.

Bernet L., Brockmann E., von Clarmann T., Kämpfer N., Mahieu E., Matzler C., Stober G., Hocke K., 2020. Trends of Atmospheric Water Vapour in Switzerland from Ground-Based Radiometry, FTIR and GNSS Data. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20 (19), 11223–11244. <https://doi.org/10.5194/acp-2020-77>.

Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H., 1992. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97 (D14), 15787–15801. <https://doi.org/10.1029/92JD01517>.

Chen B., Liu Zh., 2016. Global Water Vapor Variability and Trend from the Latest 36 Year (1979 to 2014) Data of ECMWF and NCEP Reanalyses, Radiosonde, GPS, and Microwave Satellite. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121 (19), 11442–11462. <https://doi.org/10.1002/2016JD024917>.

Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., Elgered G., 1985. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on the Estimates on Baseline Lengths. *Radio Science* 20 (6), 1593–1607. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>.

Dembelov M., Bashkuev Y., 2022a. On the Long-Term Trend of Changes in Integrated Water Vapor Based on the Results of Continuous GPS Measurements at the Observation Point IRKM (Irkutsk). In: *Proceedings of the IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (November 23–25, 2022, Moscow)*. IEEE, p. 381–385. <https://doi.org/10.1109/RMC55984.2022.10079427>.

Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., 2022b. Estimation of the Tropospheric Moisture Content Derived from GPS Observations, Radio Sounding Data, and Measurements with a Water Vapor Radiometer. *Atmospheric and Oceanic Optics* 35 (4), 359–365. <https://doi.org/10.1134/S1024856022040029>.

Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., 2023a. Changes in the Total Moisture Content of the Troposphere According to the Data of GPS Measurements and Radiosondes. In: *Proceedings of the 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. SPIE, 1278056. <https://doi.org/10.1117/12.2689777>.

Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., 2023b. Evaluation of the Model of Weighted Mean Temperature in the Troposphere over Irkutsk and Yakutsk Cities. In: *Proceedings of the 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. SPIE, 1278061. <https://doi.org/10.1117/12.2690781>.

Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., Ayurov D.B., 2023. Applied Digital Data Monitoring Platform for Ulaz (Ulan-Ude) and Badg (Badary) Continuous High-Precision GPS Measurements. In: *Proceedings of the 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. SPIE, 1278061. <https://doi.org/10.1117/12.2690974>.

Durre I., Williams C.N., Yin X., Vose R.S., 2009. Radiosonde-Based Trends in Precipitable Water over the Northern Hemisphere: An Update. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114 (D5), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2008JD010989>.

Haase J.S., Ge M., Vendel H., Calais E., 2003. Accuracy and Variability of GPS Tropospheric Delay Measurements of Water Vapor in the Western Mediterranean. *Journal of Applied Meteorology* 42 (11), 1547–1548. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)0422.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)0422.0.CO;2).

Hagemann S., Bengtsson L., Gendt G., 2003. On the Determination of Atmospheric Water Vapor from GPS Measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D21), 4678. <https://doi.org/10.1029/2002JD003235>.

Hopfield H.S., 1969. Two Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data. *Journal of Geophysical Research* 74 (18), 4487–4499. <https://doi.org/10.1029/JC074i018p04487>.

Jiang W., Chen S., Cai B., Rizos C., Wang J., Shangguan W., 2020. An Analysis of PPP-GPS-Based Decentralized Train

Multi-Sensor Navigation System. *GPS Solutions* 24 (3), 67. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00980-5>.

Kalinnikov V.V., Khutorova O.G., 2019. Validation of Integrated Water-Vapor Content from GNSS Data of Ground-Based Measurements. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 55 (4), 352–356. <https://doi.org/10.1134/S0001433819040054>.

King R.W., Bock Y., 2000. Documentation for the GAMIT GPS. Software Analysis. Version 9.9. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Li L., Li Y., He Q., Wang X., 2022. Weighted Mean Temperature Modelling Using Regional Radiosonde Observations for the Yangtze River Delta Region in China. *Remote Sensing* 14 (8), 1909. <https://doi.org/10.3390/rs14081909>.

Lukhneva O.F., Dembelov M.G., Lukhnev A.V., 2016. The Determination of Atmospheric Water Content by the Meteorological and GPS Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (4), 545–553 (in Russian) [Лухнева О.Ф., Дембелов М.Г., Лухнев А.В. Определение атмосферного влагосодержания по метеорологическим и GPS-данным // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 545–553]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222>.

Ma Y., Zhao Q., Wu K., Yao W., Liu Y., Li Z., Shi Y., 2022. Comprehensive Analysis and Validation of the Atmospheric Weighted Mean Temperature Models in China. *Remote Sensing* 14 (14), 3435. <https://doi.org/10.3390/rs14143435>.

Makama E.K., Lim H.S., 2019. Variability and Trend in Integrated Water Vapour from ERA-Interim and IGRA2 Observations over Peninsular Malaysia. *Atmosphere* 11 (9), 1012. <https://doi.org/10.3390/atmos11091012>.

Mears C., Santer B.D., Wentz F.J., Taylor K., Wehner M., 2007. Relationship Between Temperature and Precipitable Water Changes over Tropical Oceans. *Geophysical Research*

*Letters* 34 (24), L24709. <https://doi.org/10.1029/2007GL031936>.

Nilsson T., Elgered G., 2008. Long-Term Trends in the Atmospheric Water Vapor Content Estimated from Ground-Based GPS Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113, D19101. <https://doi.org/10.1029/2008JD010110>.

Ross R.J., Elliott W.P., 2001. Radiosonde-Based Northern Hemisphere Tropospheric Water Vapor Trends. *Journal of Climate* 14 (7), 1602–1612. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1602:RBNHTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1602:RBNHTW>2.0.CO;2).

Saastamoinen J., 1972. Atmospheric Correction for Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites. In: S.W. Henriksen, A. Mancini, B.H. Chovitz (Eds), *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*. Geophysics Monograph Series. Vol. 15. AGU, p. 247–251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>.

Wagner T., Beirle S., Grzegorski M., Platt U., 2006. Global Trends (1996–2003) of Total Column Precipitable Water Observed by Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) on ERS-2 and Their Relation to Near-Surface Temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111, D12102. <https://doi.org/10.1029/2005JD006523>.

Wang J., Dai A., Mears C., 2016. Global Water Vapor Trend from 1988 to 2011 and Its Diurnal Asymmetry Based on GPS, Radiosonde, and Microwave Satellite Measurements. *Journal of Climate* 29 (14), 5205–5222. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0485.1>.

Zhang F., Barriot J.-P., Xu G., Hopuare M., 2019. Analysis and Comparison of GPS Precipitable Water Estimates Between Two Nearby Stations on Tahiti Island. *Sensors* 19 (24), 5578. <https://doi.org/10.3390/s19245578>.

Zhou X., Cheng Y., Liu L., Huang Y., Sun H., 2023. Significant Increases in Water Vapor Pressure Correspond with Climate Warming Globally. *Water* 15 (18), 3219. <https://doi.org/10.3390/w15183219>.