



УДК 551.501.86+551.501.771(571.56)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.37>

Изменение влагосодержания атмосферы и приземной температуры воздуха в приарктическом пункте наблюдения Тикси

М. Г. Дембелов*

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Аннотация. Рассматривается изменение суммарного влагосодержания тропосферы в арктической зоне на примере постоянного пункта GPS-наблюдений ТИХИ (п. Тикси). Для расчета уровня влагосодержания по GPS-данным выявлены линейные и степенные регрессии соотношения средневзвешенной температуры в условном вертикальном столбе и приземной температуры воздуха, полученные по результатам радиозондирований за 10-летний период с 2012 по 2021 г. Рассмотрена скорость изменения содержания атмосферного водяного пара над Тикси в зависимости от приземной температуры за 4-летний период, отмечены сезонные вариации и уменьшение среднего уровня при температуре воздуха выше +24 °С. Получены 21-летние изменения суммарного влагосодержания по данным постоянных GPS-измерений и радиозондирований в приарктическом пункте наблюдения Тикси.

Ключевые слова: суммарное влагосодержание, GPS-измерения, метеоданные, радиозондирования, Арктика.

Для цитирования: Дембелов М. Г. Изменение влагосодержания атмосферы и приземной температуры воздуха в приарктическом пункте наблюдения Тикси // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 55. С. 37–48. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.37>

Original article

Changes in Atmospheric Moisture Content and Surface Air Temperature at the Tiksi Subarctic Observation Point

M. G. Dembelov*

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

Abstract. Changes in the total moisture content of the troposphere in the Arctic zone are examined using the ТИХИ permanent GPS observation site (Tiksi) as an example. To calculate the moisture content using GPS data, linear and power-law regressions were determined for the ratio of the “mean weighted” average temperature in a conventional vertical column to surface air temperature obtained from radiosonde observations over a 10-year period from 2012 to 2021. The rate of change in atmospheric water vapor content over Tiksi was examined as a function of surface temperature over a four-year period. Seasonal variations and a decrease in average levels at air temperatures above 24 °C were noted. Long-term changes in total moisture content were obtained using continuous GPS measurements and radiosonde observations at the Tiksi subarctic observation point.

Keywords: integrated moisture content, GPS measurements, meteorological data, radio soundings, Arctic.

For citation: Dembelov M.G. Changes in Atmospheric Moisture Content and Surface Air Temperature at the Tiksi Subarctic Observation Point. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 55, pp. 37-48. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.37> (in Russian)

Введение

Атмосферный водяной пар составляет более 60 % всего парникового содержания. В арктической зоне его содержание в зимнее время крайне минимально в силу низких температур и ограниченного процесса испарения. В летнее время в прибрежной зоне имеет место дополнительное испарение с поверхности открытой воды и тающих льдов Северного ледовитого океана, это увеличивает влагосодержание в тропосфере. Увеличение температуры воздуха способствует повышению уровня влагосодержания нижней атмосферы, и, так как водяной пар является основным парниковым газом, его рост в свою очередь приводит к увеличению температуры воздуха за счет парникового эффекта. Таким образом, присутствует так называемый эффект «положительной обратной связи» [Significant ... , 2023]. В течение последних нескольких десятилетий в целом скорость потепления Арктики вдвое выше, чем в остальной части земного шара [Arctic ... , 2023; Pithan, Mauritsen, 2014; Третий ... , 2022]. Результаты некоторых исследований оценивают арктическое потепление относительно глобального потепления с превышением до четырех раз с некоторыми различиями, связанными с рассматриваемым Арктическим регионом и временным периодом. Изменение арктического климата может существенно оказать влияние на важные системы, включая морской лед, снежный покров, горные ледники, структуры мерзлых почв и растительности [Arctic ... , 2025]. Северная Евразия представляет особый интерес для изучения высокоширотных климатических изменений, что обусловлено обширностью сухопутных территорий и наличием продолжительных рядов метеонаблюдений [Alexandrovskiy, Yurtaev, Panin, 2025; Modeling ... , 2014]. Наиболее выраженные процессы потепления и изменения гидрологического режима фиксируются здесь в зимний и весенний периоды.

В настоящее время арктическая зона России все еще имеет недостаточный охват постоянными метеорологическими и радиометрическими пунктами для наблюдений, в том числе за изменениями уровней водяного пара. Влагосодержание тропосферы в основном определяется радиозондированиями (РЗ), измерениями радиометрами водяного пара и GPS-измерениями. При этом GPS-наблюдения обладают рядом преимуществ, они применяются с дискретностью в несколько минут, обладают всепогодностью, на их работу не влияют атмосферные осадки, туман и густые облака. GPS-приемники характеризуются малыми габаритами и низким уровнем энергопотребления. В отличие от запусков радиозондов, позволяющих получать вертикальные профили температуры, давления и влажности воздуха, GPS-измерения не предоставляют таких данных. Тем не менее они обеспечивают практически непрерывную временную серию измерений, тогда как запуски радиозондов

проводятся лишь дважды в сутки. Следует отметить, что плотность сети пунктов РЗ на территории российской Арктики очень редка. На точность измерений влагосодержания атмосферы радиометрами водяного пара существенно влияют атмосферные осадки, густой туман и облачность. Продолжительные временные ряды измерений интегрированного количества водяного пара в атмосфере являются важным показателем для метеорологии и климатических исследований. В данном исследовании показан многолетний тренд изменения влагосодержания тропосферы в арктическом пункте наблюдения Тикси. Рассматривается связь между влагосодержанием и приземной температурой.

Полная зенитная тропосферная задержка и влагосодержание тропосферы

Первичные GPS-данные в формате RINEX чаще всего обрабатываются программным пакетом GAMIT, разработанным в Массачусетском технологическом институте [King, Bock, 2000]. Это программное обеспечение применяется для высокоточного позиционирования, в результате обработки попутно выявляются значения тропосферной задержки сигналов. Помимо этого, для обработки GPS-данных часто применяется метод PPP (Precise Point Positioning), позволяющий одним двухчастотным GPS-приемником достичь точность 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 GPS-сигналов [Калинников, Хуторова, 2019; An analysis ... , 2020; Многолетние ... , 2025]. Традиционно влагосодержание тропосферы определяется по радиозондовым измерениям, а также с применением моделей Саастамойнена [Saastamoinen, 1972] или Хопфильда [Hopfield, 1969]. Эти модели используют значения метеорологических параметров (атмосферное давление, температура и относительная влажность воздуха) для расчета полной зенитной тропосферной задержки. Также применяются эмпирические модели, не требующие метеорологических данных [SHAtrop ... , 2019]. Эти модели основываются на входных метеорологических параметрах, которые сформированы в виде табличных данных, систематизированных по широтным поясам и текущему времени (номер дня в году). В настоящее время осуществляется комплексирование численных данных реанализа с моделированием тропосферной задержки, получены хорошие результаты для повышения точности позиционирования [Xiao, Zhan, Zhai, 2025].

Тропосферная задержка является одной из погрешностей, которая оказывает значительное влияние на точность GPS-позиционирования. Практическое использование GPS-измерений для определения содержания водяного пара в нижней части атмосферы имеет очень важное значение в силу высокой точности получаемых результатов [Accuracy ... , 2003]. Полная зенитная тропосферная задержка (ZTD) представляет собой разницу реального пути распространения сигнала в нижней части атмосферы и пути сигнала в условиях вакуума. Значение ZTD всегда равно сумме «сухой» (гидростатической)

(ZHD) и «влажной» (ZWD) составляющих. GPS-измерение производится вдоль условной линии наблюдения от наземной станции до спутника, который очень редко бывает в зенитном направлении. Поэтому для нормирования к зенитному направлению используются специальные функции отображения, учитывающие зависимость от угла возвышения спутника [Accuracy ... , 2003]. Удобными для моделирования по данным приземных метеорологических наблюдений являются упрощенные формулы Хопфильда [Многолетние ... , 2025]:

$$\text{ZHD} = 0,0023p - 0,00497 \frac{p}{T}, \quad (1)$$

$$\text{ZWD} = 821,16 \frac{e}{T^2}. \quad (2)$$

Здесь p – атмосферное давление (гПа); T – температура воздуха (К); e – парциальное давление водяного пара (гПа).

Для определения суммарного влагосодержания тропосферы IWV по данным ZWD, полученным в результате GPS-измерений, удобно использовать формулу [Lukhneva, Dembelov, Lukhnev, 2016]:

$$\text{IWV} = 10^6 \frac{T_m}{k_2 R_W} \text{ZWD}, \quad (3)$$

где k_2 – вторая постоянная преломления ($\text{K}^2/\text{гПа}$) [Geodesy ... , 1985]; R_W – газовая постоянная для водяного пара ($\text{Дж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$) [Lukhneva, Dembelov, Lukhnev, 2016]; T_m – средневзвешенная температура в вертикальном столбе над точкой наблюдения (К). Значение T_m рассчитывается по формуле в виде отношения интегралов с учетом изменения высоты h от точки наблюдения, расположенной на высоте h_s относительно уровня моря [GPS meteorology ... , 1994]:

$$T_m = \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T} dh \bigg/ \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh. \quad (4)$$

На рис. 1 представлена схема района исследования в окрестностях приарктического п. Тикси ($\text{N}71^\circ 37'$; $\text{E}128^\circ 52'$) с указанием пунктов регулярных метеорологических, радиозондовых и GPS-наблюдений. Метеорологические данные доступны на сайте gp5.ru, метеостанция находится вблизи аэропорта Тикси.

Значения T_m для расчета значений суммарного влагосодержания над пунктом GPS-наблюдений ТИХИ (Тикси) определялись по данным РЗ в пункте аэрологии Росгидромета Полярка (см. рис. 1). Пункт Полярка расположен на расстоянии около 6 км от пункта GPS-наблюдений, отличие высот над уровнем моря не превышает 40 м. Результаты РЗ атмосферы в районе п. Тикси были получены из базы данных Университета Вайоминга (США), обеспечивающей унифицированный доступ к глобальной сети аэрологических наблюдений. Массив данных содержит вертикальные профили ключевых метеорологических параметров, включая атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха. Дискретность измерений, как правило, соответствует стандартному регламенту и составляет два зондирования в сутки.



Рис. 1. Схема расположения пунктов приземных метеорологических наблюдений, радиозондирований и GPS-наблюдений в районе п. Тикси

На рис. 2 представлены соотношения T_m и T , полученные по результатам РЗ в Тикси за 10-летний период с 2012 по 2021 г. и рассчитанные по формуле (4). Соотношения между T_m и T аппроксимированы линейной и степенной регрессиями. График степенной регрессии y_2 лучше выражает связь между двумя температурными параметрами (рис. 2). Средние отклонения значений T_m от аппроксимаций линейной и степенной регрессиями равны соответственно 4,16 К и 3,83 К.

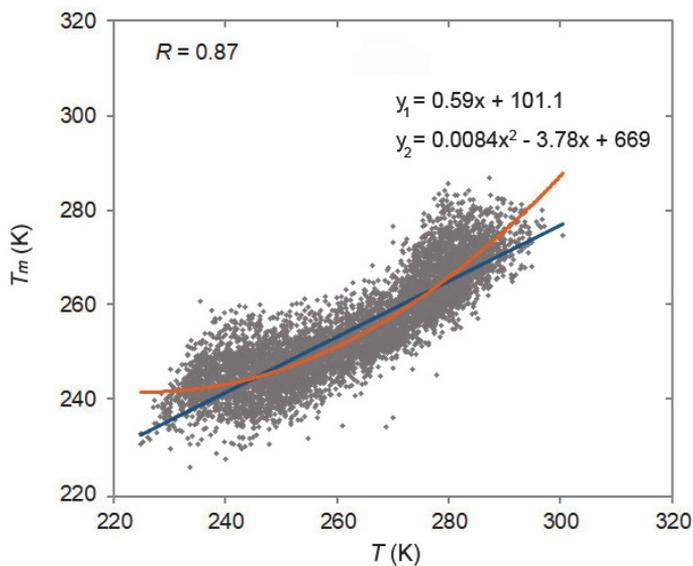


Рис. 2. Соотношения между T_m и T , линейная y_1 и степенная y_2 регрессии, рассчитанные по данным радиозондирований за 2012–2021 гг. над п. Тикси

Соотношения приземной температуры и суммарного влагосодержания

Суммарное влагосодержание тропосферы удобно представлять в виде осаждаемой воды PW в условном вертикальном столбе с основанием 1 м^2 . Параметр PW связан с суммарным водяным паром IWV соотношением: $PW = IWV/\rho$, где ρ – плотность жидкой воды (кг/м^3). На рис. 3 показаны рассчитанные по формулам (2) и (3) уровни PW в зависимости от температуры воздуха для Тикси за период 2001–2021 гг. Отметим, что при таком моделировании рассматриваются профили стандартной атмосферы, когда воздух представляется в виде идеального газа в состоянии термодинамического равновесия, при этом температура воздуха с высотой изменяется по линейному закону. Так как значения влагосодержания тропосферы за весь 21-летний период рассчитаны по приземным метеорологическим данным, то они закономерно расположены ниже линии Клаузиуса – Клапейрона [Estimating ... , 2017] для насыщенного водяного пара (см. рис. 3). Значение PW в среднем увеличивается с температурой воздуха как в холодное, так и теплое время года примерно до $+24 \text{ }^\circ\text{C}$. В зимнее время значения влагосодержания располагаются ближе к линии Клаузиуса – Клапейрона, в теплое время наблюдается сильный разброс значений.

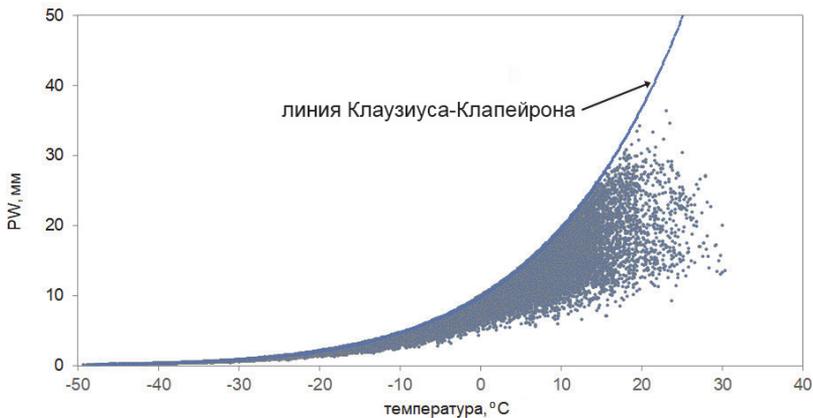


Рис. 3. Зависимости рассчитанных по формулам (2) и (3) значений PW от приземной температуры воздуха по данным метеостанции аэропорта Тикси

При определении PW по данным GPS-измерений можно наблюдать иную картину. На рис. 4 показаны зависимости уровня суммарного влагосодержания в виде осаждаемой воды PW от температуры воздуха для Тикси за период 2001–2021 гг. Значения IWV определялись с использованием формулы (3), при этом значения ZWD выявлялись вычитанием рассчитанных значений ZHD по формуле (1) из значений ZTD , полученных в ходе обработки результатов GPS-измерений. Синей линией обозначена зависимость Клаузиуса – Клапейрона для насыщенного пара, рассчитанная по приземным

метеоданным; оранжевые квадратики – усредненное значение влагосодержания для температуры воздуха с шагом 1 °С; черная линия – скользящее среднее усредненных значений (рис. 4). Усредненные значения PW увеличиваются с увеличением температуры воздуха и довольно близки линии Клаузиуса – Клапейрона при низких температурах, примерно до +6 °С. При температурах от +6 до +24 °С значения PW в среднем стабилизируются в пределах 16–18 мм. В приарктической зоне температура редко превышает +24 °С, при этом уровень влагосодержания в среднем имеет тенденцию к уменьшению. Самый быстрый рост влагосодержания наблюдается в промежутке приблизительно от –4 до +6 °С, это в среднем соответствует периодам примерно от 15 мая до 15 июня и от 1 сентября до 10 октября. В табл. приведены среднемесячные значения температуры воздуха и суммарного влагосодержания тропосферы за рассматриваемый 4-летний период в п. Тикси. Наблюдаются резкие изменения суммарного влагосодержания между маем и июнем и между августом и сентябрем.

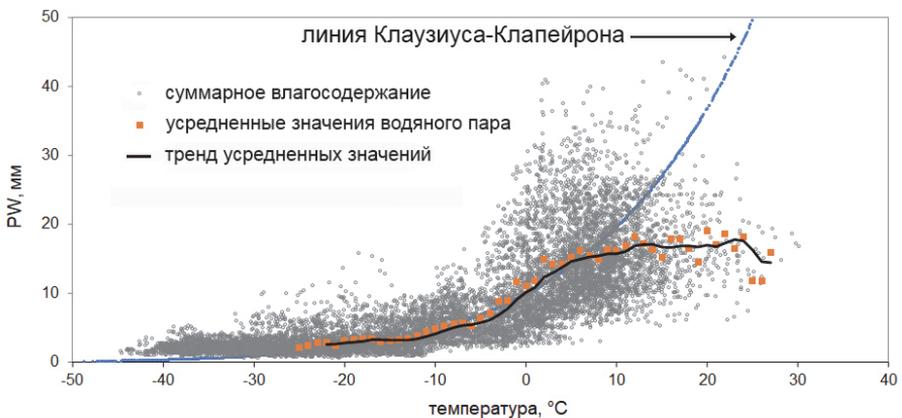


Рис. 4. Зависимости PW от приземной температуры воздуха, выявленные по GPS-наблюдениям за 2018–2021 гг. в пункте наблюдения ТИХ1

Таблица

Среднемесячные значения температуры воздуха и суммарного влагосодержания тропосферы в районе п. Тикси за период 2018–2021 гг.

	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
$t, ^\circ\text{C}$	-30,56	-27,29	-24,44	-12,59	-4,36	6,79	9,41	9,55	2,97	-6,66	-22,25	-27,08
$PW, \text{мм}$	1,78	2,53	2,66	5,24	8,97	18,37	17,52	15,34	8,75	4,97	2,59	2,1

Временные ряды изменения приземной температуры и суммарного влагосодержания тропосферы

В докладе Росгидромет в 2022 г. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации сообщается, что температура воздуха в Арктической зоне России, по данным гидрометеорологических

станций, растет быстрыми темпами, в среднем на уровне $+0,71\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие [Третий ... , 2022]. Отмечено, что потепление климата сопровождается усилением его экстремальности, что приводит к увеличению числа опасных гидрометеорологических явлений. На рис. 5, а представлено 21-летнее (2001–2021 гг.) изменение приземной температуры воздуха по данным метеорологической станции аэропорта п. Тикси. За весь период наблюдений температурный тренд определен на уровне $+2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, или $+1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие. Метеорологические наблюдения показали, что в п. Тикси скорость потепления превышает среднее приарктическое по России значение.

Эффект «положительной обратной связи», влияющий на потепление в Арктике, в первую очередь вызван увеличением уровня влагосодержания в тропосфере, как основного парникового газа. Рассмотрены 21-летние изменения значений суммарного влагосодержания PW , полученные по результатам обработки первичных данных GPS-наблюдений и по РЗ. На рис. 5, б представлены результаты значений PW по данным РЗ в пункте наблюдения Тикси (метеостанция Полярка) за период 2001–2021 гг. РЗ-наблюдения показали положительный тренд с удельным изменением на уровне $+0,33\text{ мм}$ за десятилетие. На рис. 5, в показаны изменения PW по данным GPS-наблюдений за тот же 21-летний период, выявленный тренд показал удельное изменение на уровне $+0,37\text{ мм}$ за десятилетие. Таким образом, данные о суммарном влагосодержании тропосферы над Тикси, которые получены по РЗ и GPS-измерениям, показали близкие положительные тенденции изменения за рассматриваемый 21-летний период.

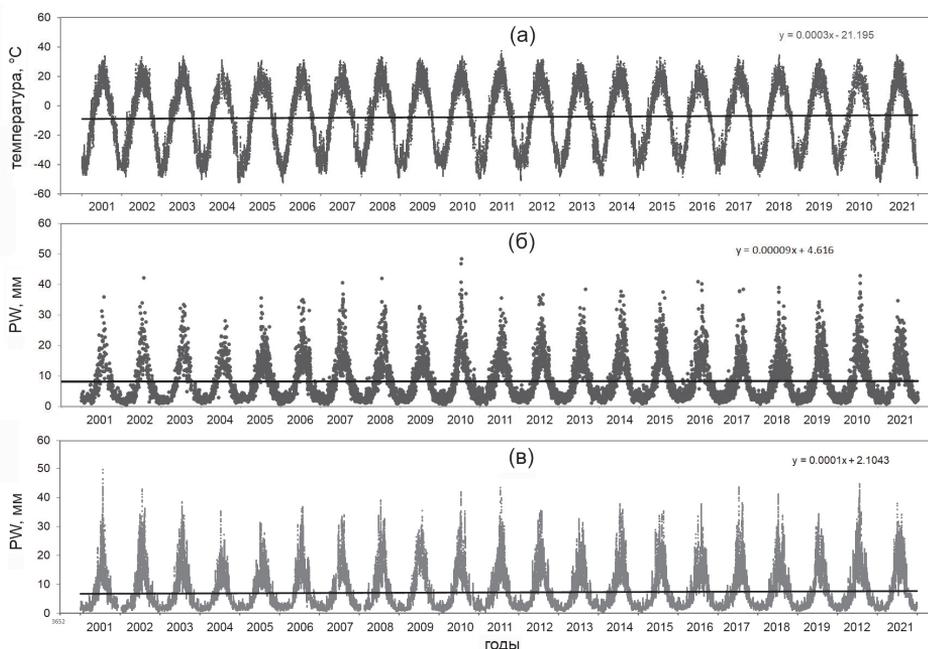


Рис. 5. Изменения за 21-летний период наблюдений (2001–2021 гг.) температуры воздуха (а), суммарного влагосодержания по данным РЗ (б) и суммарного влагосодержания по данным GPS-измерений (в). Прямыми линиями показаны линейные тренды

Заключение

GPS-измерение является одним из наиболее удобных способов получения значений влагосодержания тропосферы с интервалом временных отсечек порядка 5 мин и чаще. Посредством же РЗ значения влагосодержания регистрируются очень редко, только два раза в сутки. На измерения влагосодержания тропосферы радиометром водяного пара сильно оказывают влияние атмосферные осадки, туманы и густая облачность. Кроме того, GPS-приемники имеют небольшие размеры, обладают низким потреблением энергии, первичные данные GPS-измерений многих постоянно функционирующих станций находятся в свободном доступе в интернете.

Значения суммарного влагосодержания тропосферы по данным «влажной» компоненты зенитной тропосферной задержки определялись с использованием выявленных линейной и степенной регрессий для средневзвешенной температуры T_m в условном вертикальном столбе над пунктом Тикси. Степенная регрессия лучше описывает связь между температурами T и T_m .

Результаты данных GPS-наблюдений по PW за 2018–2021 гг. для пункта Тикси показывают, что уровень суммарного влагосодержания изменяется в соответствии с законом Клаузиуса – Клапейрона в холодное время примерно до $+6\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 4). В области низких температур (до $-4\text{ }^\circ\text{C}$) среднее изменение составило $0,19\text{ мм}/^\circ\text{C}$, при повышении температуры от -4 до $+6\text{ }^\circ\text{C}$ этот показатель возрастает до $0,9\text{ мм}/^\circ\text{C}$. При температурах от $+6$ до $+24\text{ }^\circ\text{C}$ значения PW в среднем стабилизируются в пределах $16\text{--}18\text{ мм}$. При температурах выше $+24\text{ }^\circ\text{C}$ уровень влагосодержания уменьшается. Полученная зависимость средней скорости изменения влагосодержания от температуры показала, что связь между этими параметрами в более теплое время имеет заметный нелинейный характер. Известно, что увеличение атмосферного водяного пара с ростом температуры происходит в основном за счет испарения. Если поверхностный слой почвы высыхает после периода повышенных температур, то испарение уменьшается, и это приводит к уменьшению атмосферного водяного пара [The changing ... , 2003].

Получены 21-летние ряды суммарного влагосодержания по данным запусков радиозондов и GPS-измерений в пункте Тикси. За период 1999–2021 гг. радиозондирования и GPS-измерения показали довольно близкие значения трендов, соответственно $+0,33$ и $+0,37\text{ мм}$ за десятилетие. За этот же период температурный тренд определен на уровне $+1,1\text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетие. Существенные увеличения PW и приземной температуры в пункте наблюдения Тикси подтверждают активное проявление эффекта «положительной обратной связи» в Арктике. Имеет место известный процесс арктического усиления процесса потепления. Поглощение тепла от солнечной радиации в основном осуществляется земной поверхностью, освободившейся от снежного покрова. Особую дополнительную роль играет таяние морского арктического льда, когда появляется темная вода, которая значительно больше поглощает солнечного тепла, чем лед. Более теплый воздух удерживает больше водяного пара, усиливая парниковый эффект.

Список литературы

Калинников В. В., Хуторова О. Г. Валидация интегрального содержания водяного пара по данным наземных измерений сигналов ГНСС // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 4. С. 58–63. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555458-63>

Многолетние тренды суммарного влагосодержания тропосферы в разных широтных зонах Восточной Сибири / М. Г. Дембелов, Ю. Б. Башкуев, А. В. Лухнев, В. А. Саньков // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16, № 6. 869. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-6-0869>

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. СПб. : Научное издание, 2022. 126 с.

Alexandrovskiy A., Yurtaev A., Panin A. Evolution of Soils in Northern Eurasia under Climate Change during the Late Glacial and Holocene // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58, N 4. <https://doi.org/10.1134/S1064229324602695>

An analysis of PPP-GPS-based decentralized train multi-sensor navigation system / W. Jiang, S. Chen, B. Cai [et al.] // GPS Solutions. 2020. Vol. 24 (67). <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00980-5>

Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios / Z. Ch. Li, W. B. Sun, C. X. Liang [et al.] // Advances in Climate Change Research. 2023. Vol. 4, Iss. 3. P. 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2023.06.003>

Arctic Warming: Cascading Climate Impacts and Global Consequences / I. H. Malik, R. Ahmed, J. D. Ford, A. R. Hamidi // Climate. 2025. Vol. 13. Art. 85. <https://doi.org/10.3390/cli13050085>

Estimating trends in atmospheric water vapor and temperature time series over Germany / F. Alshawaf, K. Balidakis, G. Dick [et al.] // Atmos. Meas. Tech. 2017. Vol. 10. P. 3117–3132. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3117-2017>

Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on the estimates on baseline lengths / J. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro [et al.] // Radio Science. 1985. Vol. 20, N 6. P. 1593–1607. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>

GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water / M. Bevis, S. Businger, S. Chriswell, T. A. Herring // Journal of Applied Meteorology. 1994. Vol. 33. P. 379–386. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2)

Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the Western Mediterranean / J. Haase, M. Ge, H. Vendel, E. Calais // Journal of Applied Meteorology. 2003. Vol. 42, P. 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)

Hopfield H. S. Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // Journal of Geophysical Research. 1969. Vol. 74, N 18. P. 4487–4499.

King R. W., Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 9.9. Cambridge : Mass. Inst. of Technol, 2000.

Lukhneva O. F., Dembelov M. G., Lukhnev A. V. The determination of atmospheric water content by the meteorological and GPS data // Geodynamics and Tectonophysics. 2016. Vol. 7. P. 545–553. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222>

Modeling air temperature changes in Northern Asia / A. Onuchin, M. Korets, A. Shvidenko [et al.] // Global and Planetary Change. 2014. Vol. 122. P. 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.07.011>

Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7. P. 181–184. <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>

Saastamoinen J. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The Use of Artificial Satellites for Geodesy // Geophysics Monograph Series. 1972. Vol. 15. P. 247–251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>

SHAtrop: empirical ZTD model based on CMONOC GNSS network / J. Chen, J. Wang, J. Wang, W. Tan // Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ. 2019. Vol. 44. P. 1588–1595. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170384>

Significant Increases in Water Vapor Pressure Correspond with Climate Warming Globally / X. Zhou, Y. Cheng, L. Liu [et al.] // Water. 2023. Vol. 15, 3219. <https://doi.org/10.3390/w15183219>

The changing character of precipitation / K. E. Trenberth, A. Dai, R. M. Rasmussen, D. B. Parsons // Bulletin of American Meteorology Society. 2003. Vol. 84. P. 1205–1217. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>

Xiao Y., Zhan X., Zhai Y. Tightly bounding residual tropospheric delay of meteorological-based model for GNSS integrity enhancement // *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75, Iss. 12. P. 8535–8544. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.04.010>

References

Kalinnikov V.V., Khutorova O.G. Validatsiya integralnogo sodержaniya vodyanogo para po dannym nazemnykh izmereniy signalov GNSS [Validation of integrated water-vapor content from GNSS data of ground-based measurements]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55(4), pp. 352-356. <https://doi.org/10.1134/S0001433819040054>. (in Russian)

Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., Lukhnev A.V., Sankov V.A. Mnogoletniye trendy sum-marnogo vlagosoderzhaniya troposfery v raznykh shirotnykh zonakh Vostochnoy Sibiri [Multiyear trends in the total moisture content of the troposphere in different-latitude zones of Eastern Siberia]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2025, vol. 16, iss. 6. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-6-0869> (in Russian)

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Third assessment report on climate change and their consequences on the territory of the Russian Federation]. Ed. by V.M. Kattsov. St. Petersburg, Science-intensive technologies Publ., 2022, 126 p. (in Russian)

Alexandrovskiy A., Yurtaev A., Panin A. Evolution of Soils in Northern Eurasia under Climate Change during the Late Glacial and Holocene. *Eurasian Soil Science*, 2025, vol. 58, no. 4. <https://doi.org/10.1134/S1064229324602695>

Jiang W., Chen S., Cai B., Rizos C., Wang J., Shangguan W. An analysis of PPP-GPS-based decentralized train multi-sensor navigation system. *GPS Solutions*, 2020, vol. 24 (67). <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00980-5>

Li Z. Ch., Sun W.B., Liang C.X., Xing X.H., Li Q.X. Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios. *Advances in Climate Change Research*, 2023, vol. 4, iss. 3, pp. 335-346. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2023.06.003>

Malik I.H., Ahmed R., Ford J.D., Hamidi A.R. Arctic Warming: Cascading Climate Impacts and Global Consequences. *Climate*, 2025, vol. 13, art. 85. <https://doi.org/10.3390/cli13050085>

Alshawaf F., Balidakis K., Dick G., Heise S., Wickert J. Estimating trends in atmospheric water vapor and temperature time series over Germany. *Atmos. Meas. Tech.*, 2017, vol. 10, pp. 3117–3132. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3117-2017>

Davis J., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., Elgered G. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on the estimates on baseline lengths. *Radio Science*, 1985, vol. 20, no. 6, pp. 1593-1607. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>

Bevis M., Businger S., Chriswell S., Herring T.A. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, vol. 33, pp. 379-386. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2)

Haase J., Ge M., Vendel H., Calais E. Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the Western Mediterranean. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, vol. 42, pp. 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)

Hopfield H.S. Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 1969, vol. 74, no. 18, pp. 4487-4499.

King R.W., Bock Y. *Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 9.9*. Cambridge, Mass. Inst. of Technol., 2000.

Lukhneva O.F., Dembelov M.G., Lukhnev A.V. The determination of atmospheric water content by the meteorological and GPS data. *Geodynamics and Tectonophysics*, 2016, vol. 7, pp. 545-553. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222>.

Onuchin A., Korets M., Shvidenko A., Burenina T., Musokhranova A. Modeling air temperature changes in Northern Asia. *Global and Planetary Change*, 2014, vol. 122, pp. 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.07.011>

Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, pp. 181-184. <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>

Saastamoinen J. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The Use of Artificial Satellites for Geodesy. *Geophysics Monograph Series*, 1972, vol. 15, pp. 247-251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>

Chen J., Wang J., Wang J., Tan W. SHAtrop: empirical ZTD model based on CMONOC GNSS network. *Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ.*, 2019, vol. 44, pp. 1588-1595. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170384>

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

Trenberth K.E., Dai A, Rasmussen R.M., Parsons D.B. The changing character of precipitation. *Bulletin of American Meteorology Society*, 2003, vol. 84, pp. 1205-1217. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>

Xiao Y., Zhan X., Zhai Y. Tightly bounding residual tropospheric delay of meteorological-based model for GNSS integrity enhancement. *Advances in Space Research*, 2025, vol. 75, iss. 12, pp. 8535-8544. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.04.010>

Сведения об авторе

Дембелов Михаил Георгиевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, лаборатория
электромагнитной диагностики
Институт физического материаловедения
СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
e-mail: mdembelov@mail.ru

Information about the author

Dembelov Mikhail Georgievich

Candidate of Sciences (Physics
and Mathematics), Senior Research Scientist,
Laboratory of Electromagnetic Diagnostics
Institute of Physical Materials Science SB RAS
6, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047,
Russian Federation
e-mail: mdembelov@mail.ru

Код научной специальности: 1.6.18

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 02.03.2026; принята к публикации 13.03.2026

The article was submitted January, 30, 2026; approved after reviewing March, 02, 2026; accepted for publication March, 13, 2026