Соотношение влагосодержания атмосферы и приземной температуры воздуха в прибрежной зоне центральной части озера Байкал

М. Г. Дембелов [1], А. В. Лухнев [2]

[1] *Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия*
E-mail: mdembelov@mail.ru

[2] *Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: loukhnev@crust.irk.ru

Рассматриваются метеорологические и GPS-данные (*англ.* Global Positioning System) для изучения взаимосвязи суммарного влагосодержания тропосферы и приземной температуры воздуха в новом пункте постоянных GPS-наблюдений MKSM (пос. Максимиха), расположенном в прибрежной зоне центральной части оз. Байкал. Ускорение глобального потепления главным образом происходит из-за увеличения атмосферного содержания водяного пара, который представляется основным парниковым газом. Двадцатилетнее непрерывное метеонаблюдение показало положительную скорость изменения суммарного влагосодержания на уровне +0,71 мм за десятилетие, а также изменение приземной температуры на величину около +1,05 °C за десятилетие. Для расчёта уровня влагосодержания по GPS-данным определена линейная регрессия соотношения средневзвешенной температуры в условном вертикальном столбе и приземной температуры воздуха, полученной по результатам радиозондовых измерений в пункте метеорологии и аэрологии Усть-Баргузин за период с 2012 по 2025 г. Взаимосвязь между суммарным влагосодержанием атмосферы, установленным на основе GPS-измерений над пунктом MKSM, и приземной температурой воздуха за период 2022–2025 гг. показала, что наиболее значительный рост данного соотношения наблюдается в переходные сезоны — весной и осенью. При температуре от –30 до +17 °C среднее отклонение между усреднёнными значениями влагосодержания атмосферы PW (*англ.* Precipitable Water) по GPS-наблюдениям и значениями PW для насыщенного пара (линия Клаузиуса – Клапейрона) составляет 1,9 мм. При достижении температуры +17 °C наблюдается существенное снижение темпа роста усреднённого влагосодержания, а при температуре +20 °C и выше данный показатель перестаёт увеличиваться и стабилизируется на уровне около 28 мм.

Ключевые слова: суммарное влагосодержание, GPS-измерения, метеоданные, радиозондовые измерения, Байкальская зона

Одобрена к печати: 16.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-406-416

Введение

В летнее время атмосферный водяной пар составляет примерно 50–65 % от общего парникового газового содержания в нижних слоях атмосферы. Практически 99 % водяного пара атмосферы находится в её нижней части — в тропосфере. Постоянное наблюдение за изменением уровня водяного пара используется для целей прогноза выпадения атмосферных осадков (Khaniani et al., 2021; Vedel, Huang, 2004). Суммарное влагосодержание IWV (*англ.* Integrated Water Vapor) (в кг/м^2) в атмосфере удобно представлять в виде количественного содержания жидкой воды, которая может образоваться при конденсации всего водяного пара в условном вертикальном воздушном столбе (Bevise et al., 1994). Осаждаемая вода PW (*англ.* Precipitable Water) (в м) связана с суммарным влагосодержанием соотношением: $PW = IWV/\rho$, где ρ — плотность жидкой воды (в кг/м^3). Для получения данных о влагосодержании тропосферы чаще всего используются результаты запусков радиозондов, измерения радиометром водяного пара, дистанционные зондирования и наборы данных реанализа (Zhou et al., 2024). Радиозондовые измерения имеют высокую стоимость использования и редкую сеть, это огра-

ничивает их применение. Кроме этого, для определения суммарного влагосодержания учитывается интегрирование по высоте, при этом ограничение высоты запусков радиозондов и их отклонение приводят к существенным погрешностям (Dai, 2006). Измерение наземным микроволновым радиометром водяного пара считается наиболее достоверным инструментом для мониторинга атмосферного влагосодержания и влагозапаса облаков, но его применение практически невозможно во время выпадения осадков. Глобальные навигационные спутниковые системы становятся наиболее востребованным источником получения данных для определения PW, результаты измерений выдают точечные наблюдения с высоким временным разрешением независимо от погодных условий (Zhao et al., 2022).

Согласно шести наиболее популярным наборам данных выявлено, что средняя глобальная температура за последние пять лет (2020–2024) стала самой высокой за всю историю наблюдений, а 2024 г. — самым тёплым годом за всю историю наблюдений (https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature). Согласно соотношению Клаузиуса – Клапейрона каждое повышение температуры на 1 °C приводит к увеличению влагосодержания атмосферы примерно на 7 % (Trenberth et al., 2005). С одной стороны, потепление способствует ускорению испарения влаги с земной поверхности, что приводит к учащению и усилению засушливых явлений. С другой стороны, повышение температуры увеличивает влагосодержание атмосферы (Groisman et al., 2005). Водяной пар, играющий существенную роль в естественном парниковом эффекте, выступает ключевым элементом положительной обратной связи, ускоряющей процесс атмосферного потепления (Zhou et al., 2023).

В конце 2021 г. начаты непрерывные GPS-измерения (*англ.* Global Positioning System) на пункте наблюдения MKSM (пос. Максимиха), расположенном в прибрежной зоне оз. Байкал (53° 15′ 49″ с. ш., 108° 44′ 41″ в. д.). Важнейший инструмент для изучения современных высокоточных геодинамических процессов в Байкальской рифтовой системе — GPS-геодезия (Саньков и др., 2009). Основная цель постоянных GPS-измерений в пункте MKSM заключается в определении деформации земной коры и изменения положения тектонических блоков. Помимо обеспечения высокоточного позиционирования, GPS-измерения дают возможность получать регулярные результаты мониторинга полной зенитной тропосферной задержки сигналов ZTD (*англ.* Zenith Tropospheric Delay) (Haase et al., 2003). Эта величина отражает интегральное влияние тропосферы, включая «сухую» ZHD (*англ.* Zenith Hydrostatic Delay) и «влажную» ZWD (*англ.* Zenith Wet Delay) компоненты, на распространение сигнала от спутников к приёмнику, расположенному на земной поверхности. Влажная компонента ZWD практически пропорциональна тропосферному суммарному влагосодержанию над GPS-пунктом, возникает возможность использования измерений сети GPS для постоянного дистанционного зондирования атмосферы (Bevise et al., 1994).

В последнее время для обработки первичных GPS-данных в формате RINEX (*англ.* Receiver Independent Exchange Format) всё чаще применяется метод точечного позиционирования PPP (*англ.* Precise Point Positioning), который опирается на высокоточные орбитальные SP3 (*англ.* Standard Product 3) и временные CLK (*англ.* System Clock) поправки спутников. Эти данные, как правило, предоставляются Международной службой IGS (*англ.* International GNSS Service). Метод PPP даёт возможность с достаточно высокой точностью вычислять значения ZTD для каждого отдельного приёмника. Технологии GNSS (*англ.* Global Navigation Satellite System) успешно заменяют другие методы в определении влагосодержания тропосферы, например радиозондовые наблюдения. Исследования показывают, что мониторинг зенитной тропосферной задержки и горизонтальных градиентов водяного пара в режиме реального времени позволяет своевременно выявлять признаки интенсивных осадков и крупномасштабных штормовых событий (Zhao et al., 2023). Уплотнение и расширение сети GPS-станций обеспечивает возможность построения трёхмерной пространственной модели распределения влагосодержания в приземных слоях атмосферы с высокой разрешающей способностью. Тропосферные результаты обработанных GPS-данных служат регулярным уточнением наборов данных атмосферного реанализа ERA5 (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5) (https://www.ecmwf.int). На основе долгосрочных данных реанализа, включая GPS-измерения, установлен положительный тренд

в изменении общего содержания водяного пара в столбе атмосферы (PW) за период с 1958 по 2020 г., составляющий в среднем около 0,19 мм за десятилетие (Ren et al., 2023). При этом среднегодовая максимальная суточная температура увеличивалась примерно на 0,2 °C за каждое десятилетие в период с 1973 по 2022 г. (https://www.climate.gov/news-features).

В статье рассматривается взаимосвязь между суммарным влагосодержанием тропосферы и приземной температурой воздуха. Расположение пункта MKSM в прибрежной зоне обусловливает существенное влияние оз. Байкал на результаты выявления влагосодержания тропосферы методом GPS-измерений. За последние 20 лет фиксируется значительное потепление, при этом изменение суммарного влагосодержания в тропосфере выступает ключевым фактором парниковой обратной связи. Особое внимание уделяется сезонным вариациям влагосодержания, наиболее выраженным в летний период.

Определение суммарного влагосодержания нижней части атмосферы

Удобными для моделирования компонент полной зенитной тропосферной задержки по данным приземных метеорологических наблюдений являются формулы Хопфильд (Hopfield, 1969). Индекс рефракции выражается формулой (Essen, Froome, 1951):

$$N = \frac{77{,}6}{T} p + \frac{3{,}73 \cdot 10^5}{T^2} e = N_D + N_W,$$

где p — атмосферное давление (в гПа); T — температура воздуха (в K); e — парциальное давление водяного пара (в гПа); N_D — компонента для сухого воздуха; N_W — компонента для водяного пара. Полная зенитная тропосферная задержка определяется суммой интегралов $\mathrm{ZTD} = 10^{-6} \int_0^\infty N_D(h)\,\mathrm{d}h + 10^{-6} \int_0^\infty N_W(h)\,\mathrm{d}h.$ Изменение индекса рефракции по высоте можно представить в виде $N(h) = N_D(1 - h/h_D)^4 + N_W(1 - h/h_W)^4$ (Hopfield, 1969). Здесь h_D — эффективная высота гидростатической компоненты (в м), $h_D = 40136 + 148{,}72t$; t — поверхностная температура (°C); h_W — высота тропосферы для средних широт, принятая равной 11 км. В результате интегрирования вертикального профиля сухой компоненты от 0 до h_D и влажной компоненты от 0 до h_W получаются формулы для компонент зенитной задержки:

$$\mathrm{ZHD} = 0{,}0023 p - 0{,}00497 \frac{p}{T}, \tag{1}$$

$$\mathrm{ZWD} = 821{,}16 \frac{e}{T^2}. \tag{2}$$

Для определения суммарного влагосодержания тропосферы IWV по данным ZWD, полученным в результате GPS-измерений, удобно использовать формулу (Lukhneva et al., 2016):

$$\mathrm{IWV} = 10^6 \frac{T_m}{k_2 R_W} \mathrm{ZWD}, \tag{3}$$

где k_2 — вторая постоянная преломления (в K^2/гПа) (Essen, Froome, 1951); R_W — газовая постоянная для водяного пара (в Дж·K^{-1}·$\mathrm{кг}^{-1}$) (Lukhneva et al., 2016); T_m — средневзвешенная температура в вертикальном столбе над точкой наблюдения (в K). Значение T_m рассчитывается по формуле в виде отношения интегралов с учётом изменения высоты h от точки наблюдения, расположенной на высоте h_s относительно уровня моря (Bevise et al., 1994):

$$T_m = \int_{h_s}^\infty \frac{e}{T}\,\mathrm{d}h \Big/ \int_{h_s}^\infty \frac{e}{T^2}\,\mathrm{d}h. \tag{4}$$

Влагосодержание по GPS-измерениям и приземным метеоданным в пункте MKSM

Пункт GPS-наблюдений MKSM расположен на расстоянии 24 км от метеорологической станции Росгидромета Усть-Баргузин, на которой выполняются регулярные аэрологические измерения (*рис. 1*). Станции Максимиха и Усть-Баргузин расположены на берегу оз. Байкал, оба пункта наблюдения находятся на одной высоте над уровнем Мирового океана (~465 м). Результаты определения влагосодержания атмосферы посредством GPS-измерений и данные метеонаблюдений показывают выраженную зависимость от воздействия оз. Байкал. Для расчёта средневзвешенной температуры T_m по формуле (4) и определения IWV по GPS-наблюдениям с помощью формулы (3) в пункте MKSM можно применять данные метеостанции Усть-Баргузин. С использованием результатов 8634 вертикальных зондирований атмосферы в пункте Усть-Баргузин за период с 2012 по 2025 г. по формуле (4) вычислена линейная регрессия соотношения приземной и средневзвешенной температуры: $T_m = 43 + 0{,}83T$. В формуле (3) влажная компонента тропосферной задержки ZWD выделяется из полной задержки ZTD вычитанием из неё сухой составляющей ZHD, которая рассчитывается по формуле (1). На *рис. 2* приведены временные ряды влагосодержания тропосферы (PW) за июнь 2025 г., полученные по данным GPS-измерений, приземных метеорологических наблюдений и запусков радиозондов. Данные GPS-измерений демонстрируют более высокую согласованность с результатами запусков радиозондов по сравнению с данными, полученными на основе приземных метеонаблюдений. Коэффициент взаимной корреляции между GPS-данными и данными запусков радиозондов составил 0,93 при среднем отклонении разницы значений 1,9 мм, тогда как для сопоставления значений PW по приземным метеоданным и данным запусков радиозондов коэффициент корреляции равен 0,78, а среднее отклонение — 3,2 мм. Имеет место высокая точность совпадения данных GPS и радиозондов, несмотря на расстояние в 24 км между GPS-пунктом MKSM и пунктом аэрологии Усть-Баргузин.

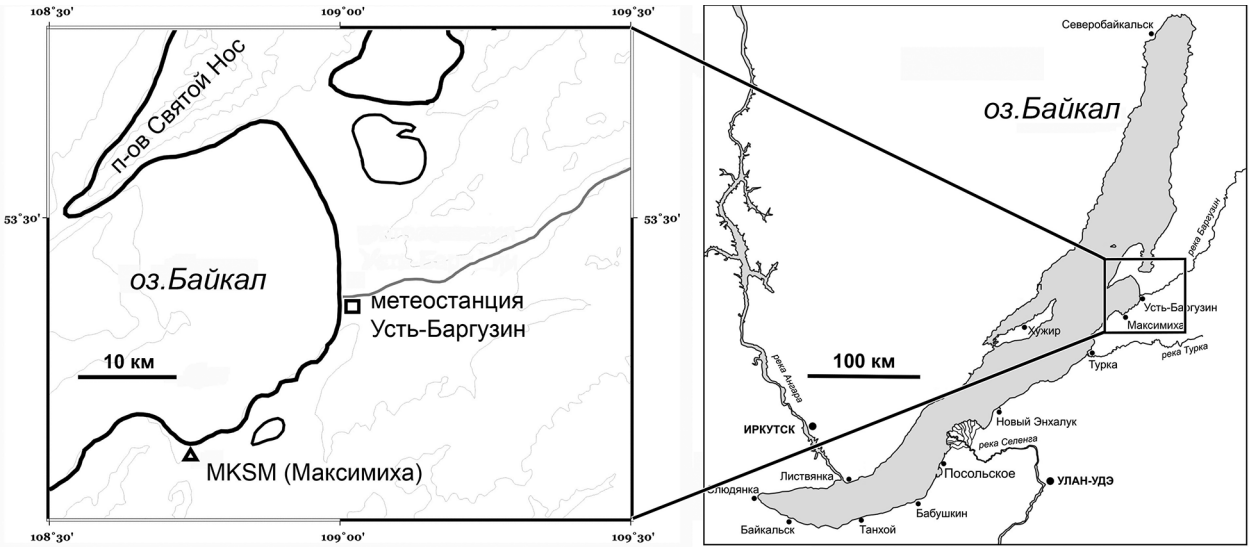

Рис. 1. Схема расположения пункта GPS-наблюдений MKSM и метеостанции Росгидромета Усть-Баргузин

Воздействие водной массы оз. Байкал выступает определяющим фактором различий температуры и относительной влажности воздуха между прибрежной зоной и территориями, расположенными на удалении от водоёма. На *рис. 3* представлены значения годовых измерений температуры воздуха на метеостанции Усть-Баргузин с 2006 по 2025 г. Красным цветом отмечено усреднённое изменение температуры за весь 20-летний рассматриваемый период.

На побережье оз. Байкал хорошо прослеживается особенность годовой динамики температуры воздуха. Многолетние температурные данные демонстрируют чёткую связь между сезонными процессами на оз. Байкал и ходом температуры. Так, самые низкие показатели температуры традиционно регистрируются в начале февраля — в период, когда завершается процесс ледостава на всей акватории озера. Примечательно, что этот минимум наступает примерно на неделю позже, чем в Иркутске, расположенном вдали от байкальского побережья. Аналогичная закономерность прослеживается и для периода максимальной температуры, её пик приходится на начало августа, что соответствует времени максимального прогрева верхнего слоя байкальской воды и наблюдается примерно на 11 дней позже, чем в Иркутске. Абсолютные максимумы температуры в Иркутске значительно превосходят аналогичные показатели в Усть-Баргузине. Однако благодаря меньшим суточным температурным колебаниям в Усть-Баргузине усреднённые за многолетний период как минимальные, так и максимальные температуры в обоих пунктах близки.

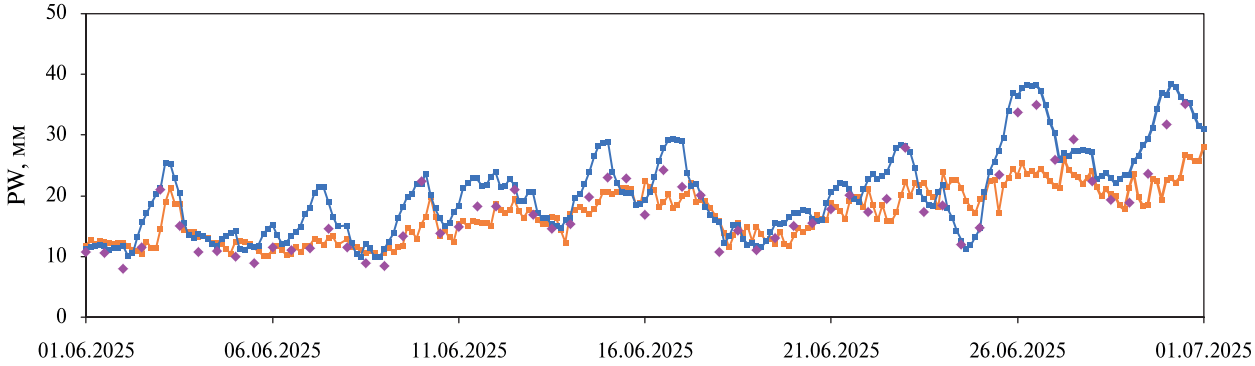

Рис. 2. Сравнительные временные ряды PW, полученные по GPS-измерениям (синий график), приземным метеоданным (оранжевый график) и данным радиозондов (фиолетовые ромбы)

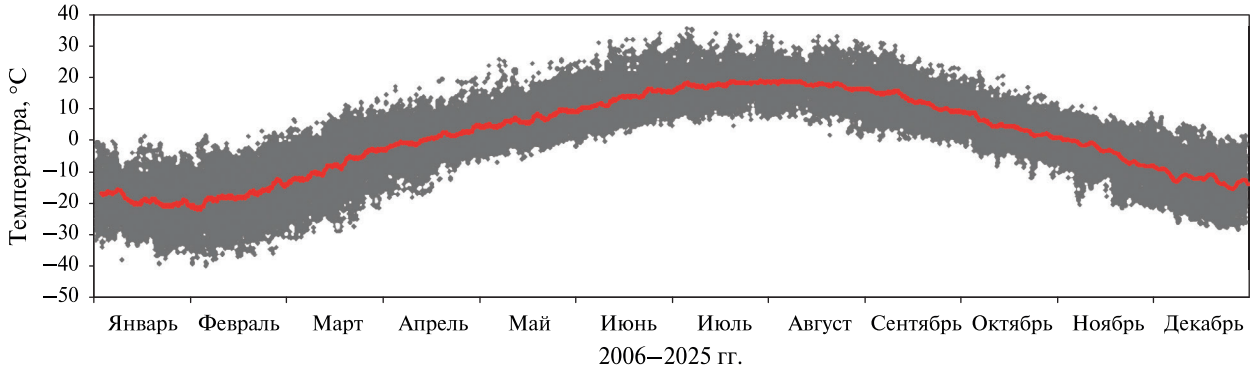

Рис. 3. Набор годовой температуры воздуха в пос. Усть-Баргузин за 20-летний период. Красным цветом показана усреднённая температура

На *рис. 4* показаны изменения PW, рассчитанные по приземным метеорологическим данным в Усть-Баргузине за 20 лет (2006–2025) по формулам (2)–(4). Здесь же приведены значения PW по данным GPS-измерений в пункте MKSM. Линейный тренд PW по метеоданным показал положительную динамику (+0,71 мм за десятилетие). В то же время температурный тренд оказался равным +1,05 °C за десятилетие. В средних широтах Сибири наблюдается устойчивый тренд повышения среднегодовой температуры воздуха, что представляется частью глобального потепления. Этот процесс ведёт к изменениям климатических условий. Среднегодовая температура на большей части России вошла в пятёрку самых высоких значений с 1936 г. Наиболее заметное превышение нормы зафиксировано в Сибирском федеральном округе (+0,94 °C) (https://seakc.meteoinfo.ru).

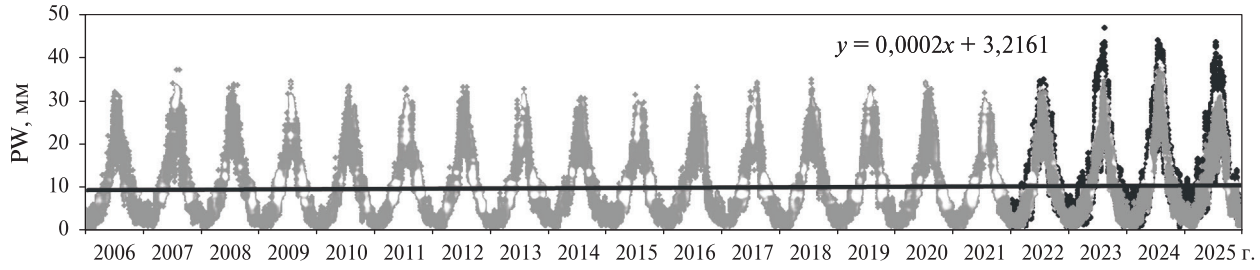

Рис. 4. Графики PW, рассчитанные по метеоданным за 2006–2025 гг. (серый цвет) и GPS-данным за 2022–2025 гг. (чёрный цвет)

Регулярные GPS-наблюдения можно считать удобным методом получения данных о влагосодержании для прогнозирования погоды. Они портативные, энергоэкономные и не зависят от атмосферных осадков и сильной облачности (Haase et al., 2003). Определение влагосодержания тропосферы GPS-измерениями всецело связано с атмосферным давлением, температурой воздуха и давлением водяного пара. Результаты сопоставления значений PW между данными по метеонаблюдениям и GPS-измерениям за период 2022–2025 гг. показали среднее отклонение 2,4 мм. Коэффициент взаимной корреляции между этими данными составил 0,92.

Связь влагосодержания атмосферы и приземной температуры воздуха

Нижние слои тропосферы содержат значительную часть водяного пара, играющего ключевую роль в образовании атмосферных осадков. Здесь происходит поглощение и обратное излучение длинноволновой радиации земной поверхностью, что обеспечивает дополнительный нагрев тропосферы. Водяной пар в тропосфере играет доминирующую роль в обратной климатической связи. По мере потепления климата ожидается, что количество влаги в атмосфере, которое регулируется уравнением Клаузиуса – Клапейрона, будет расти гораздо быстрее, чем общее количество осадков, которое регулируется тепловым балансом поверхности за счёт испарения (Trenberth et al., 2005).

Для моделирования уровня влагосодержания тропосферы по приземным метеоданным учитывается модель стандартной атмосферы, когда вертикальный градиент температуры примерно равен 0,0062 К/м (Кашкин и др., 2014). Предполагается, что водяной пар ведёт себя как идеальный газ и находится в состоянии термодинамического равновесия. На *рис. 5* показана зависимость парциального давления водяного пара от приземной температуры воздуха для Усть-Баргузина за период 2006–2025 гг. Значения парциального давления закономерно находятся ниже линии Клаузиуса – Клапейрона для давления насыщенного пара. Усреднённое парциальное давление должно увеличиваться с повышением температуры вдоль линии насыщенного пара с некоторым пологим наклоном роста в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха. Однако по достижении значения примерно 16,5 гПа при температуре около +21 °С среднее парциальное давление прекращает рост, дальнейшее изменение температуры не приводит к увеличению парциального давления, которое остаётся на приблизительно постоянном уровне. Очевидно, что усреднённое суммарное влагосодержание, рассчитанное по приземным метеоданным с применением формул (2) и (3), будет демонстрировать аналогичную парциальному давлению водяного пара зависимость от температуры воздуха.

Зависимость суммарного влагосодержания в форме осаждаемой воды PW, рассчитанного на основе GPS-измерений, от температуры воздуха за 2021–2025 гг. проиллюстрирована на *рис. 6*. Значения PW в разные сезоны года окрашены в разные цвета. Линия Клаузиуса – Клапейрона рассчитана по формулам (3) и (4) для PW по приземным метеоданным с учётом насыщенного пара, когда относительная влажность воздуха равна 100 %.

Оранжевые квадратики и оранжевая линия — усреднённые значения PW при каждом увеличении температуры на 1 °C и их сглаженный тренд. При отрицательной температуре воздуха (ниже –9 °C) среднее влагосодержание находится выше линии Клаузиуса – Клапейрона. При температуре –9 °C наблюдается пересечение графиков, поэтому при более высокой температуре усреднённые значения PW располагаются ниже линии Клаузиуса – Клапейрона. В диапазоне температуры от –30 до –9 °C скорость роста влагосодержания составляет в среднем 0,12 мм/°C. Максимальная скорость роста влагосодержания (в среднем 1,1 мм/°C) наблюдается в температурном диапазоне от +3 до +17 °C, характерном для весенне-осенних периодов. При этом динамика изменения графика для насыщенного пара демонстрирует аналогичную скорость роста. В интервале от –30 до +17 °C среднее отклонение разницы усреднённых значений PW по GPS-наблюдениям и значений PW для насыщенного пара составляет 1,9 мм.

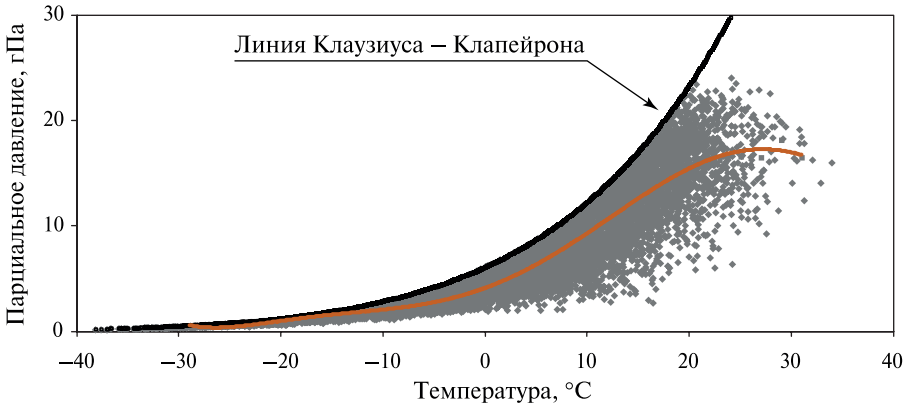

Рис. 5. Зависимость парциального давления водяного пара от температуры воздуха за 2021–2025 гг. Линия Клаузиуса – Клапейрона для давления насыщенного пара показана чёрным цветом, оранжевым — тренд усреднённого парциального давления

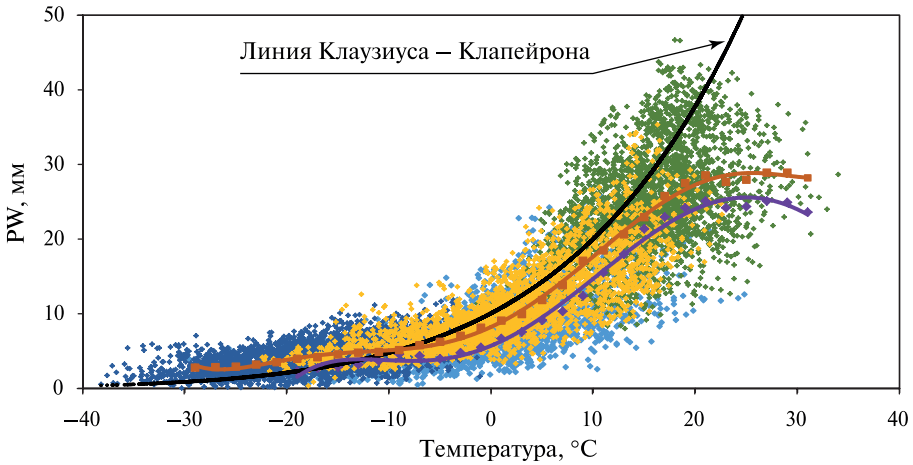

Рис. 6. Зависимость PW от приземной температуры воздуха, выявленная по GPS-наблюдениям за 2022–2025 гг. в пункте наблюдения MKSM. Летние наблюдения показаны зелёным цветом, осенние — жёлтым, зимние — синим, весенние — голубым. Чёрная линия — линия Клаузиуса – Клапейрона для насыщенного пара. Оранжевые квадратики и оранжевая линия — усреднённые значения PW для GPS-пункта MKSM и их сглаженный тренд. Фиолетовые ромбы и фиолетовая линия — усреднённые значения PW для GPS-пункта IRKM и их сглаженный тренд

Согласно уравнению Клаузиуса – Клапейрона, повышение температуры воздуха должно приводить к увеличению содержания влаги в атмосфере. Но график усреднённых значений PW при температуре воздуха примерно +20 °C и выше перестаёт расти, и значения в среднем находятся на уровне 28±0,5 мм. В качестве сравнения на *рис. 6* фиолетовыми ромбами

и фиолетовой линией приведены аналогичные усреднённые значения PW за тот же 4-летний период для пункта наблюдения IRKM (Иркутск), расположенного вдали от прибайкальской зоны. Здесь так же при температуре около +20 °C и выше усреднённые значения PW прекращают расти и стабилизируются на уровне 25±0,5 мм. Причём при температуре воздуха выше +30 °C прослеживается тенденция к уменьшению среднего влагосодержания в атмосфере. Наблюдается существенное отличие усреднённых значений PW в GPS-пунктах MKSM и IRKM. При положительной температуре рассматриваемые величины различаются в среднем на 3,2 мм. Превышение усреднённых показателей влагосодержания тропосферы над пунктом MKSM связано прежде всего с заметно более высокой средней относительной влажностью воздуха в прибайкальской зоне. В то же время средняя температура воздуха в сравниваемых пунктах в тёплое время года остаётся примерно на одном уровне (https://ru.weatherspark.com). Прекращение роста тропосферного влагосодержания в тёплый период года обусловлено преимущественно локальными процессами гидрологического цикла в континентальных регионах, при которых большая часть накопления атмосферной влаги и летних осадков формируется за счёт местного испарения (Numaguti, 1999). На уровне условно критической температуры (+20 °C) происходит фиксация усреднённого накопления влагосодержания в тропосфере, скорее всего связанное с высыханием земной поверхности и уменьшением испарения.

Заключение

Анализ данных о влагосодержании атмосферы, полученных методом GPS-наблюдений в новом пункте MKSM, выявил высокую степень согласованности с результатами запусков радиозондов. Коэффициент взаимной корреляции между рассмотренными данными составил 0,93 при среднем отклонении разницы значений 1,9 мм. Для определения суммарного влагосодержания по результатам GPS-измерений рассчитана линейная регрессия соотношения приземной и средневзвешенной в условном вертикальном столбе температуры ($T_m = 43 + 0{,}83T$) по данным 8634 запусков радиозондов в пункте метеорологии и аэрологии Усть-Баргузин. По результатам оценки 20-летних приземных метеорологических данных линейный тренд суммарного влагосодержания составил +0,71 мм за десятилетие, изменение средней температуры за тот же период достигло +1,05 °C за десятилетие. Сопоставление значений PW, полученных по данным метеорологических наблюдений и GPS-измерений за период 2022–2025 гг., показало среднее отклонение 2,4 мм и коэффициент взаимной корреляции 0,92.

Соотношение значений PW в пункте MKSM, полученных по данным GPS-наблюдений, и температуры воздуха за 4-летний период показало, что скорость изменения содержания атмосферного водяного пара варьируется в разные сезоны года и уменьшается с повышением температуры воздуха. При температуре воздуха выше +20 °C значения PW прекращают рост и стабилизируются на уровне 28±0,5 мм (см. *рис. 6*). Сопоставление с данными по г. Иркутску, расположенному на удалении от оз. Байкал, показало, что значения PW начинают стабилизироваться подобным образом при достижении температуры +20 °C, однако уровень стабилизации оказывается заметно меньшим (25±0,5 мм) и обусловлен пониженной средней относительной влажностью воздуха при такой температуре. Наблюдаемая сезонная изменчивость связи между содержанием водяного пара и приземной температурой воздуха свидетельствует о том, что положительная обратная связь в климатической системе в тёплый период может иметь меньшую значимость, чем прогнозируется на основе соотношения Клаузиуса – Клапейрона.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физического материаловедения СО РАН по теме № 0270-2024-0008 «Развитие радиофизических методов исследования динамики поверхности суши, водоёмов и атмосферы Земли в СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и СВЧ-диапазонах радиоволн».

Литература

1. *Кашкин В. Б.*, *Владимиров В. М.*, *Клыков А. О.* Зенитная тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС/GPS по спутниковым данным ATOVS // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 615–621.
2. *Саньков В. А.*, *Лухнев А. В.*, *Мирошниченко А. И.*, *Ашурков С. В.*, *Бызов Л. М.*, *Дембелов М. Г.*, *Кале Э.*, *Девершер Ж.* Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 424. № 5. С. 664–668.
3. *Bevis M.*, *Businger S.*, *Chriswell S. et al.* GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water // J. Applied Meteorology and Climatology. 1994. V. 33. P. 379–386. DOI: 10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2.
4. *Dai A.* Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity // J. Climate. 2006. V. 19. P. 3589–3606. DOI: 10.1175/JCLI3816.1.
5. *Essen L.*, *Froome K. D.* The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24,000 Mc/s // Proc. Physical Soc. Section B. 1951. V. 64. P. 862–875. DOI: 10.1088/0370-1301/64/10/303.
6. *Groisman P. Ya.*, *Knight R. W.*, *Easterling D. R. et al.* Trends in intense precipitation in the climate record // J. Climate. 2005. V. 18. P. 1236–1251. DOI: 10.1175/JCLI3339.1.
7. *Haase J.*, *Ge M.*, *Vendel H.*, *Calais E.* Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the Western Mediterranean // J. Applied Meteorology and Climatology. 2003. V. 42. P. 1547–1568. DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1547:AAVOGT>2.0.CO;2.
8. *Hopfield H. S.* Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // J. Geophysical Research. 1969. V. 74(18). P. 4487–4499. DOI: 10.1029/JC074i018p04487.
9. *Khaniani A. S.*, *Motieyan H.*, *Mohammadi A.* Rainfall forecast based on GPS PWV together with meteorological parameters using neural network models // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2021. V. 214. Article 105533. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105533.
10. *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. V. 7. P. 545–553. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0222.
11. *Numaguti A.* Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1999. V. 104. P. 1957–1972. DOI: 10.1029/1998JD200026.
12. *Ren D.*, *Wang Y.*, *Wang G.*, *Liu L.* Rising trends of global precipitable water vapor and its correlation with flood frequency // Geodesy and Geodynamics. 2023. V. 14. P. 355–367. DOI: 10.1016/j.geog.2022.12.001.
13. *Trenberth K. E.*, *Fasullo J.*, *Smith L.* Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor // Climate Dynamics. 2005. V. 24. P. 741–758. DOI: 10.1007/s00382-005-0017-4.
14. *Vedel H.*, *Huang X.-Y.* Impact of ground based GPS data on numerical weather prediction // J. Meteorological Soc. of Japan. 2004. V. 82. No. 1B. P. 459–472. DOI: 10.2151/jmsj.2004.459.
15. *Zhao Q.*, *Zhang X.*, *Wu K. et al.* Comprehensive precipitable water vapor retrieval and application platform based on various water vapor detection techniques // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 2507. DOI: 10.3390/rs14102507.
16. *Zhao L.*, *Cui M.*, *Song J.* An improved strategy for real-time troposphere estimation and its application in the severe weather event monitoring // Atmosphere. 2023. V. 14(1). Article 46. DOI: 10.3390/atmos14010046.
17. *Zhou X.*, *Cheng Y.*, *Liu L. et al.* Significant increases in water vapor pressure correspond with climate warming globally // Water. 2023. V. 15. Article 3219. DOI: 10.3390/w15183219.
18. *Zhou L.*, *Cao Y.*, *Shi C. et al.* Quantifying the atmospheric water balance closure over mainland China using ground-based, satellite, and reanalysis datasets // Atmosphere. 2024. V. 15(4). Article 497. DOI: 10.3390/atmos15040497.

Ratio of atmospheric moisture content to surface air temperature in the coastal zone of the central part of Lake Baikal

M. G. Dembelov [1], A. V. Lukhnev [2]

[1] *Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia*
E-mail: mdembelov@mail.ru
[2] *Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*
E-mail: loukhnev@crust.irk.ru

The article examines meteorological and GPS (Global Positioning System) data to study the relationship between total tropospheric moisture content and surface air temperature at the new MKSM (Maksimikha) permanent GPS observation site located in the central part of the coastal zone of Lake Baikal. Acceleration of global warming is primarily due to an increase in atmospheric water vapor that is the primary greenhouse gas. Twenty years of continuous meteorological observations have shown a rate of change in total moisture content of +0.71 mm per decade, as well as a change in surface air temperature of approximately +1.05 °C per decade. To calculate the moisture content level using GPS data, a linear regression was found between the ratio of the weighted average temperature in a conventional vertical column to the surface air temperature, obtained from the results of radio soundings at the Ust-Barguzin meteorology and aerology station for the period from 2012 to 2025. The relationship between the total moisture content of the atmosphere, obtained from GPS measurements above the MKSM station, and the surface air temperature for the period 2022–2025 showed that the most significant increase in this ratio is observed during the transitional seasons of spring and autumn. At temperatures from −30 to +17 °C, the average deviation between the average PW (Precipitable Water) values from GPS observations and the PW values for saturated vapor (Clausius–Clapeyron line) is 1.9 mm. Upon reaching a temperature of +17 °C, a significant decrease in the growth rate of the average moisture content is observed. At temperatures of +20 °C and above, this indicator stabilizes at around 28 mm.

Keywords: total moisture content, GPS measurements, meteorological data, radiosonde measurements, Baikal zone

Accepted: 16.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-406-416

References

1. Kashkin V. B., Vladimirov V. M., Klykov A. O., Zenith tropospheric delay of GLONASS/GPS signals on the basis of ATOVS satellite data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, V. 28, No. 1, pp. 68–73, DOI: 10.1134/S1024856015010066.
2. San'kov V. A., Lukhnev A. V., Miroshnichenko A. I. et al., Extension in the Baikal rift: Present-day kinematics of passive rifting, *Doklady Earth Sciences*, 2009, V. 425, pp. 205–209, DOI: 10.1134/S1028334X09020056.
3. Bevis M., Businger S., Chriswell S. et al., GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 1994, V. 33, pp. 379–386, DOI: 10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2.
4. Dai A., Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity, *J. Climate*, 2006, V. 19, pp. 3589–3606, DOI: 10.1175/JCLI3816.1.
5. Essen L., Froome K. D., The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24,000 Mc/s, *Proc. Physical Soc. Section B*, 1951, V. 64, pp. 862–875, DOI: 10.1088/0370-1301/64/10/303.
6. Groisman P. Y., Knight R. W., Easterling D. R. et al., Trends in intense precipitation in the climate record, *J. Climate*, 2005, V. 18, pp. 1236–1251, DOI: 10.1175/JCLI3339.1.
7. Haase J., Ge M., Vendel H., Calais E., Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the Western Mediterranean, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2003, V. 42, pp. 1547–1568, DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1547:AAVOGT>2.0.CO;2.
8. Hopfield H. S., Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data, *J. Geophysical Research*, 1969, V. 74(18), pp. 4487–4499, DOI: 10.1029/JC074i018p04487.

9. Khaniani A. S., Motieyan H., Mohammadi A., Rainfall forecast based on GPS PWV together with meteorological parameters using neural network models, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, V. 214, Article 105533, DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105533.
10. 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, V. 7, pp. 545–553, DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0222.
11. Numaguti A., Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: experiments using an atmospheric general circulation model, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, V. 104, pp. 1957–1972, DOI: 10.1029/1998JD200026.
12. Ren D., Wang Y., Wang G., Liu L., Rising trends of global precipitable water vapor and its correlation with flood frequency, *Geodesy and Geodynamics*, 2023, V. 14, pp. 355–367, DOI: 10.1016/j.geog.2022.12.001.
13. Trenberth K. E., Fasullo J., Smith L., Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor, *Climate Dynamics*, 2005, V. 24, pp. 741–758, DOI: 10.1007/s00382-005-0017-4.
14. Vedel H., Huang X.-Y., Impact of ground based GPS data on numerical weather prediction, *J. Meteorological Soc. of Japan*, 2004, V. 82, No. 1B, pp. 459–472, DOI: 10.2151/jmsj.2004.459.
15. Zhao Q., Zhang X., Wu K. et al., Comprehensive precipitable water vapor retrieval and application platform based on various water vapor detection techniques, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Article 2507, DOI: 10.3390/rs14102507.
16. Zhao L., Cui M., Song J., An improved strategy for real-time troposphere estimation and its application in the severe weather event monitoring, *Atmosphere*, 2023, V. 14(1), Article 46, DOI: 10.3390/atmos14010046.
17. Zhou X., Cheng Y., Liu L. et al., Significant increases in water vapor pressure correspond with climate warming globally, *Water*, 2023, V. 15, Article 3219, DOI: 10.3390/w15183219.
18. Zhou L., Cao Y., Shi C. et al., Quantifying the atmospheric water balance closure over mainland China using ground-based, satellite, and reanalysis datasets, *Atmosphere*, 2024, V. 15(4), Article 497, DOI: 10.3390/atmos15040497.