



УДК 551.510.52+556.123

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.32>

Влагосодержание тропосферы над пунктом наблюдения Усть-Баргузин

М. Г. Дембелов

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

М. Е. Овдин

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

Объединенная дирекция Баргузинского государственного природного биосферного заповедника и Забайкальского национального парка, пос. Усть-Баргузин

Аннотация. Исследуется влагосодержание тропосферы над пунктом наблюдения Усть-Баргузин в период с 2013 по 2017 г. Для изучения влагосодержания тропосферы используются данные приземных метеорологических измерений, а также вертикальных атмосферных профилирований, выполненных методами радиозондирования и спутниковой локации полярно-орбитальной системы NOAA. Результаты вертикальных профилирований позволяют получать метеорологические данные на разных высотных уровнях. Выявлена регрессия зависимости значений средневзвешенной температуры по упругости водяного пара от значений приземной температуры воздуха для пункта Усть-Баргузин по данным зондирования за 2013–2017 гг. Рассчитываются параметры полной тропосферной зенитной задержки, которая является суммой «сухой», или гидростатической, и «влажной» компонент. По значениям последней определяется количество суммарного водяного пара и количество потенциально возможной осаждаемой воды над пунктом наблюдения. Рассмотрена возможность получения исходных данных для создания новых численных моделей тропосферной зенитной задержки и суммарного осаждаемого водяного пара для задач метеорологии.

Ключевые слова: метеорологические данные, вертикальное зондирование атмосферы, показатель преломления, тропосферная задержка, влагосодержание.

Для цитирования: Дембелов М. Г., Овдин М. Е. Влагосодержание тропосферы над пунктом наблюдения Усть-Баргузин // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 32–45. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.32>

Введение

В последние два десятилетия наблюдается заметное сокращение атмосферных осадков на территории Северного Китая, Монголии и Забайкалья [Атмосферные блокинги в Западной ... , 2018]. В течение данного периода отмечается пониженный уровень водостока р. Селенги, основного поставщика водной массы в оз. Байкал, а также повышенный уровень пожарной опасности в лесных массивах. Одной из причин такого явления может быть следствие глобального изменения климата. Цель исследования заключается в определении годовой динамики уровня влагосодержания тропосферы над

пос. Усть-Баргузин как ключевым пунктом наблюдения на территории Забайкальского национального парка на основе метеорологических данных.

Большое внимание в данной работе уделено полному содержанию атмосферного водяного пара, который играет важную роль в качестве основного климатического параметра в динамике тепловых процессов в атмосферных и гидрологических циклах в локальном и глобальном масштабах. Сложное распределение облаков и дождевых осадков обусловлено быстрой изменчивостью содержания водяного пара в нижней части атмосферы. Температура и влажность, как правило, немонотонно изменяются с высотой. Количественная оценка содержания атмосферного водяного пара определяется в суточном ходе по параметру влажной тропосферной зенитной задержки (*ZWD*). Параметр *ZWD* можно выделить из полной тропосферной зенитной задержки (*ZTD*), учитывая дополнительно только барометрические данные в пункте наблюдения. В летнее время при высоком влагосодержании и высокой температуре воздуха значения *ZWD* принимают максимальные и наиболее вариабельные значения [Хуторова, Хуторов, Тептин, 2018]. Количество водяного пара в атмосфере над пунктом наблюдения определяется в виде вертикально интегрированной массы водяного пара в расчете на единицу площади (*IWV*). Соответствующая параметру *IWV* осаждаемая вода определяется в виде колонки жидкой воды (*PW*, мм) [Диагностика содержания атмосферного ... , 2015; Veis, Businger, Chriswell, 1994].

В районе пос. Усть-Баргузин под эгидой Аэрологической службы Росгидромета выполняются в целом регулярные запуски метеорологических зондов на высоту до 40 км. Отметим, что запуски метеозондов иногда происходят через продолжительные технические перерывы. Так, отсутствие данных по радиозондированиям в Усть-Баргузине наблюдалось с 28 мая 2017 г. по 28 февраля 2018 г. В настоящее время радиозонды остаются наиболее достоверным средством получения метеорологических данных в условном вертикальном столбе. Новым альтернативным методом получения вертикальных метеоданных является использование современного инструментального комплекса АТОВС на базе полярно-орбитальных спутников NOAA. Для определения высотных изменений давления, температуры и упругости водяного пара практически в любой точке планеты появилась возможность применения новых космических технологий [Кашкин, 2013; Кашкин, Владимиров, Клыков, 2014].

Индекс рефракции и тропосферная зенитная задержка

При использовании высокоточных спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO) обнаруживаются погрешности позиционирования, связанные с задержкой навигационных сигналов в ионосфере, стратосфере, тропопаузе и тропосфере. Задержка сигналов в нижней части атмосферы, которая является нейтральной, называется тропосферной задержкой. В случае зенитного направления сигнала задержка называется тропосферной зенитной задержкой (*ZTD*). Скорость распространения сигнала c зависит от коэффициента преломления среды n в нейтральной атмосфере: $c = c_0/n$, где c_0 – скорость света в вакууме.

Индекс рефракции в тропосфере (N) подчиняется закону аддитивности и записывается в виде суммы «сухой» и «влажной» компонент [Smith, Weintraub, 1953]:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = \frac{k_1}{T} p + \frac{k_2}{T^2} e = N_{DRY} + N_{WET}, \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления; $k_1 = 77,6$ – первая рефракционная константа, К/мбар (1 мбар = 10^2 Н/м²); $k_2 = 3,73 \cdot 10^5$ – вторая рефракционная константа, К²/мбар; T – абсолютная температура, К; p – атмосферное давление, мбар; e – упругость водяного пара, мбар. Здесь $N_{DRY} = \frac{77,6}{T} p$ – индекс рефракции для сухого воздуха, зависящий от изменений температуры и давления воздуха, $N_{WET} = \frac{3,73 \cdot 10^5}{T^2} e$ – индекс рефракции для водяного пара. На рисунке 1 показан годовой ход приземных параметров N , N_{DRY} и N_{WET} для пос. Усть-Баргузин за 2017 г. «Влажная» компонента N_{WET} вносит существенно меньший вклад в определение индекса рефракции (коэффициент преломления), особенно в зимний период. «Сухая» компонента N_{DRY} составляет значительную часть индекса рефракции.

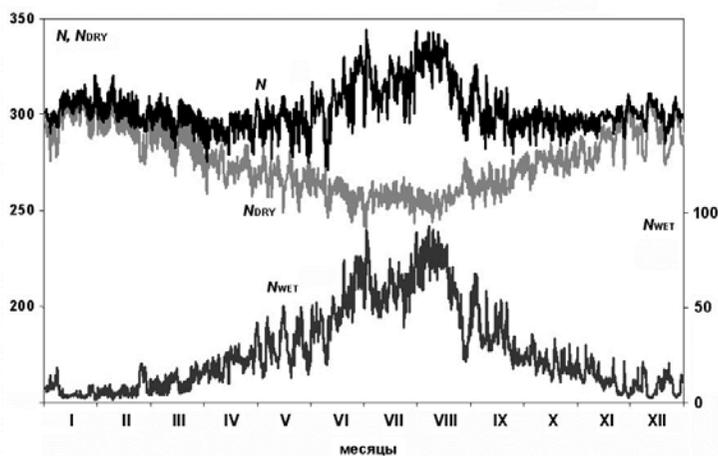


Рис. 1. Значения N , N_{DRY} и N_{WET} по месяцам 2017 г. для пос. Усть-Баргузин

Формула (1) определяет индекс рефракции N , если известны температура, давление и упругость водяного пара в пункте наблюдения. Из формулы для N следует, что ZTD также является суммой «сухой» (ZHD) и «влажной» (ZWD) составляющих. Полная задержка пути сигнала от GPS-спутника до приемной антенны равна разности геометрического расстояния и реального пути сигнала в атмосфере: $ZTD = \int_{\text{Атмосф}} n(h)dh - \int_{\text{Вакуум}} dh$. Следовательно-

но, компоненты зенитной задержки могут быть получены посредством интегрирования по вертикальному профилю соответствующих индексов рефракции:

$$ZHD = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N_{DRY}(h) dh, \quad (2)$$

$$ZWD = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N_{WET}(h) dh, \quad (3)$$

где h_s – высота расположения пункта наблюдения над уровнем моря, N_{DRY} , N_{WET} – зависящие от высоты индексы рефракции сухого воздуха и водяного пара. Отметим, что интегрирование для водяного пара может быть ограничено верхней частью тропосферы, т. е. примерно до 11 000–12 000 м, а для сухого воздуха интегрирование может быть продолжено в область тропопаузы и нижней стратосферы.

Для расчета параметров ZHD и ZWD по приземным метеоданным наиболее точной и обоснованной является модель Саастамойнена [Saastamoinen, 1972]:

$$ZHD = \frac{0,002277 p}{f(\varphi, h_s)}, \quad (4)$$

$$ZWD = \frac{0,002277 e \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right)}{f(\varphi, h_s)}. \quad (5)$$

Здесь $f(\varphi, h_s) = 1 - 0,00266 \cos 2\varphi - 0,00028 h_s$, где φ – географическая широта расположения приемника в градусах; h_s – высота приемника над уровнем моря, км. Для пункта Усть-Баргузин знаменатель $f(\varphi, h_s)$ в формулах (4) и (5) равен приблизительно 1,0005, и в расчетах ZHD и ZWD этим множителем можно пренебречь.

Суммарный водяной пар и осаждаемая вода в тропосфере

Текущее значение «сухой» компоненты ZHD может быть достаточно точно рассчитано с использованием значений приземного давления по формуле (4), учитывая приближение $f(\varphi, h_s) \approx 1$. При обработке первичных измеренных GPS-данных учитываются поправки, связанные с неоднородностью нижней части атмосферы в виде тропосферной зенитной задержки ZTD [Кашкин, 2013]. В этом случае для выявления текущего значения «влажной» составляющей ZWD достаточно вычесть значение «сухой» компоненты из измеренного значения ZTD : $ZWD = ZTD - ZHD$. При наличии приземных метеорологических данных значение ZWD рассчитывается непосредственно по формуле (5). В качестве примера на рис. 2 показаны графики годовых изменений полной тропосферной зенитной задержки ZTD и ее компонент ZHD и ZWD , рассчитанных для пункта наблюдения Усть-Баргузин за 2017 г.

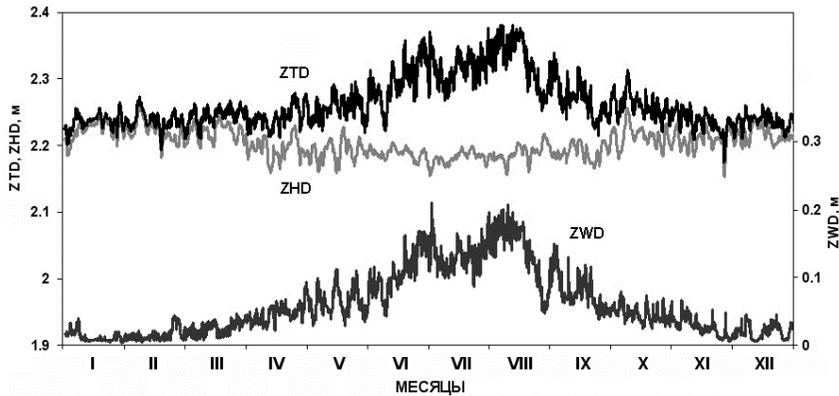


Рис. 2. Годовой ход рассчитанных по метеоданным значений ZTD , ZHD и ZWD для пункта наблюдения Усть-Баргузин за 2017 г.

Выражение $N_{WET} = \frac{3,73 \cdot 10^5}{T^2} e$, входящее в формулу (1), вставим в формулу (3) для параметра ZWD :

$$ZWD = 10^{-6} k_2 \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh. \quad (6)$$

В работах [Диагностика содержания атмосферного ... , 2015; GPS meteorology: remote ... , 1992; Geodesy by radio interferometry ... , 1985], посвященных тематике влагосодержания, описывается параметр средневзвешенной температуры по упругости водяного пара T_m над пунктом наблюдения:

$$T_m = \frac{\int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T} dh}{\int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh}. \quad (7)$$

Для нормальных атмосферных условий, учитывая формулу (7) и соотношение $\frac{e}{\rho_{wv} \cdot T} = R_w$, где ρ_{wv} – плотность водяного пара, $\text{кг}/\text{м}^3$, $R_w \approx 4,6$ – газовая постоянная для водяного пара, $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$, формулу (6) можно записать в виде

$$ZWD = 10^{-6} \frac{k_2}{T_m} R_w I_{wv}. \quad (8)$$

Здесь $I_{wv} = \int_{h_s}^{\infty} \rho_{wv} dh$ – суммарный водяной пар в килограммах в расчете на единицу площади. Осаждаемая вода определяется в виде колонки жидкой

воды PW , м. Имеет место соотношение $PW = IWV / \rho$, где ρ – плотность жидкой воды, кг/м^3 .

Формула (8) дает возможность определять над пунктом наблюдения суммарный водяной пар (IWV), а также потенциальный уровень осаждаемой воды в тропосфере (PW). В теплое время года количество суммарного водяного пара имеет максимальное значение в тропосфере. Измеряемые величины ZTD практически пропорциональны в летнее время уровню влагосодержания над пунктом наблюдения. Поэтому имеется возможность использования в задачах метеорологии значений тропосферной задержки, получаемых в результате обработки первичных данных постоянных GPS/ГЛОНАСС-измерений, для изучения вариативности влагосодержания нижней части атмосферы.

Вертикальные профили температуры воздуха

Наиболее громоздким при нахождении значений суммарного водяного пара IWV по данным «влажной» компоненты тропосферной задержки является нахождение значений средневзвешенной температуры по упругости водяного пара по приземным данным температуры воздуха. Для расчета по формуле (7) необходимо знание данных по температуре и упругости водяного пара в вертикальном столбе.

Помимо запусков метеозондов для определения вертикальных профилей температуры, давления и относительной влажности воздуха в настоящее время активно используются современные космические технологии с помощью инструментального комплекса ATOVS на полярно-орбитальных спутниках NOAA [Кашкин, 2013; Кашкин, Владимиров, Клыкков, 2014]. При отсутствии облачности сканирующий спектрофотометр, входящий в комплекс ATOVS, позволяет определять профили метеорологических данных до высоты 40 км над поверхностью Земли (<http://ready.arl.noaa.gov>).

На рисунке 3 *a, б* показаны сравнительные графики измеренных вертикальных профилей температуры, полученных для разных сезонных условий над пунктом наблюдения Усть-Баргузин по данным запусков радиозондов Аэрологической службой Росгидромета и по данным зондирования спутниками NOAA. Наблюдается достаточно хорошее соответствие полученных результатов, которые могут быть использованы для целей определения рефракционных параметров тропосферы.

На рисунке 4 приведены линейная ($T_m = 43 + 0,83 \cdot T$) и квадратичная ($T_m = 431 - 2,05 \cdot T + 0,0053 \cdot T^2$) регрессии соотношений приземной температуры (T) и средневзвешенной температуры (T_m) по упругости водяного пара. Регрессии выявлены по данным 2715 вертикальных зондирований атмосферы за период с 2013 по 2017 г. и рассчитаны по формуле (7) для пос. Усть-Баргузин. Показано, что средневзвешенная температура до высоты нижней части стратосферы может быть определена по данным приземной температуры воздуха.

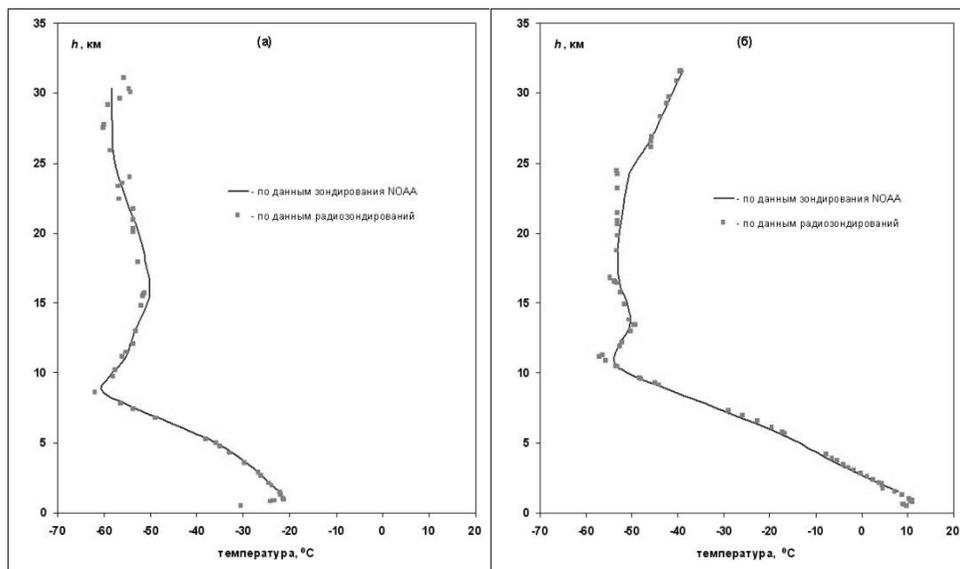


Рис. 3. Сравнения высотных температурных профилей, полученных методами радиозондирования и спутникового зондирования NOAA 6 марта (а) и 6 июня 2018 г. (б)

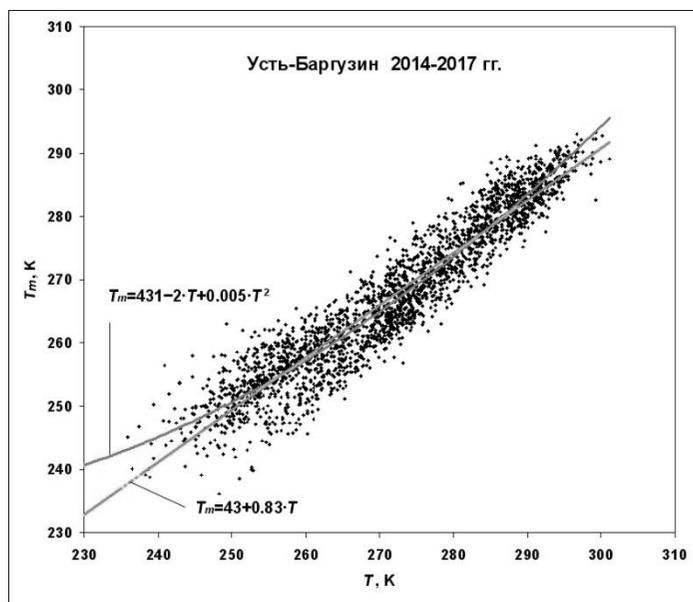


Рис. 4. Соотношение параметров T и T_m , выявленных по данным метеорологических зондирований над пос. Усть-Баргузин с 2013 по 2017 г.

Численные результаты

Используя метеорологические данные для пункта наблюдения Усть-Баргузин, находящиеся в свободном доступе в сети интернет (<http://www.rp5.ru>), мы выполнили расчеты полной тропосферной зенитной задержки ZTD , а также ее «сухой» ZHD и «влажной» ZWD компонент по

формулам Саастамоинена (4)–(5) за 2013–2017 гг. Для определения суммарного водяного пара по формуле (8) использовались рассчитанные регрессии для средневзвешенной температуры по упругости водяного пара (см. рис. 3). Для квадратичного варианта регрессии СКО температурных данных несколько меньше, чем для линейной регрессии.

На рисунках 5, *a–d* приведены годовые ряды полученных значений суммарного водяного пара в виде осаждаемой воды в тропосфере PW и положительные значения приземной температуры для пункта наблюдения Усть-Баргузин за 2013–2017 гг. Здесь же указаны уровни выпавших атмосферных осадков, накопленных за 6 предыдущих часов относительно временных отсечек. Как правило, накануне выпадения осадков отмечается заметный рост уровня влагосодержания PW .

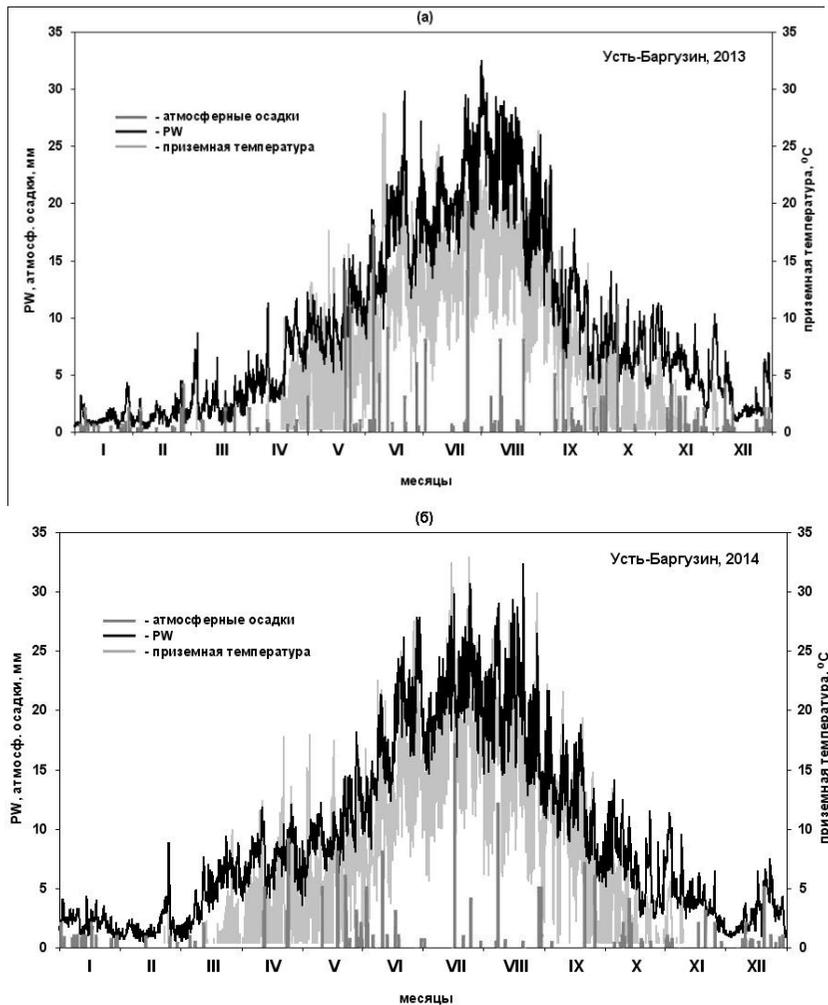


Рис. 5

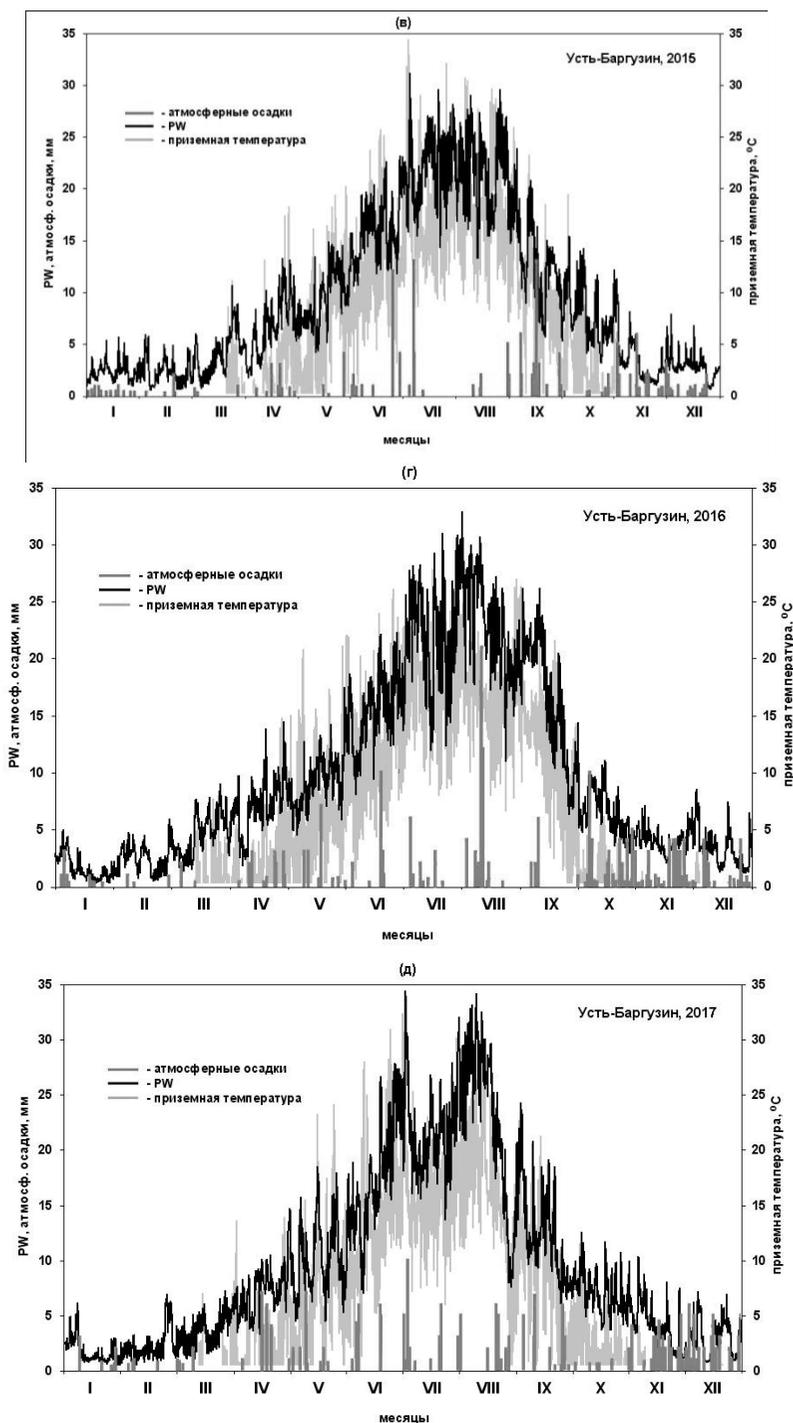


Рис. 5. Временные ряды влагосодержания тропосферы PW и положительной приземной температуры, а также текущие уровни 6-часовых накоплений атмосферных осадков (мм) над пунктом наблюдения Усть-Баргузин за 2013–2017 гг.

Как видно на рис. 5 *a–d*, высокие значения PW не всегда связаны с выпадением атмосферных осадков ввиду недостаточности на тот момент степени насыщения водяных паров в тропосфере. Повышение уровня влагосодержания соответствует выпадениям осадков, как правило, при резком понижении температуры воздуха и наличии восходящих потоков воздушных масс [Марченко, Мордвинов, Антохин, 2012; Benevides P., Catalao J., Miranda, 2015]. Можно наблюдать соответствие фактов выпадений осадков повышению уровня влагосодержания и понижению приземной температуры.

В течение пяти рассматриваемых лет наименьшее количество годовых суммарных атмосферных осадков наблюдалось в 2015 г. (рис. 6). В летний период этого года на территории Забайкальского национального парка была зафиксирована максимальная площадь лесных пожаров за последние 30 лет.

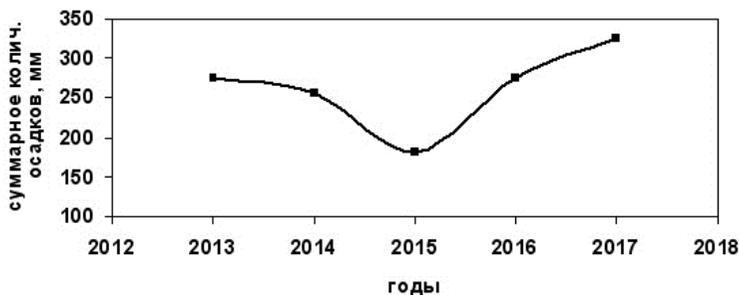


Рис. 6. Межгодовые изменения количества суммарных атмосферных осадков в пос. Усть-Баргузин с 2013 по 2017 г.

Летний период времени, когда приземная температура воздуха и уровень влагосодержания тропосферы принимают максимальные значения, особенно интересен с точки зрения возможности возникновения лесных пожаров из-за недостатка дождей. На рисунке 7 приведены графики межгодовых суммарных за летний период значений атмосферных осадков и усредненные за сутки значения приземной температуры воздуха и уровня влагосодержания тропосферы в летний период над пунктом наблюдения Усть-Баргузин с 2013 по 2017 г. Из рисунка видно, что минимальному значению суммарных летних атмосферных осадков в 2015 г. соответствуют в этот же год максимальное значение усредненной температуры воздуха и минимальное значение усредненного уровня влагосодержания. Таким образом, для сильно засушливого летнего периода 2015 г. характерен повышенный уровень среднего температурного значения, а также пониженный средний уровень влагосодержания тропосферы. Для возникновения обильных атмосферных осадков необходимы: 1) повышенный уровень влагосодержания нижней атмосферы, а также 2) существенное понижение температуры воздуха и 3) сильные восходящие потоки воздушных масс [Caldas-Alvarez, Khodayar, Vock, 2017]. К сожалению, летом 2015 г. таких благоприятных условий для сильных осадков наблюдалось незначительно. 8 июля 2015 г. имело место выпадение наиболее существенных атмосферных осадков на уровне 13 мм, затем заметные дожди прошли лишь 31 августа и 7 сентября

на уровне 5 и 6 мм соответственно. Образование засушливых периодов обычно происходит при отсутствии трех вышеназванных факторов осадкообразования, а также при недостаточном уровне одного из факторов. В Байкальской зоне за последние семь лет отмечалось преобладание траекторий северо-западных и северных направлений переноса воздушных масс. Наблюдалось ослабление восточноазиатского муссона, который оказывал существенное влияние на количество атмосферных осадков в Прибайкалье и Забайкалье [Атмосферные блокинги в Западной ... , 2018].

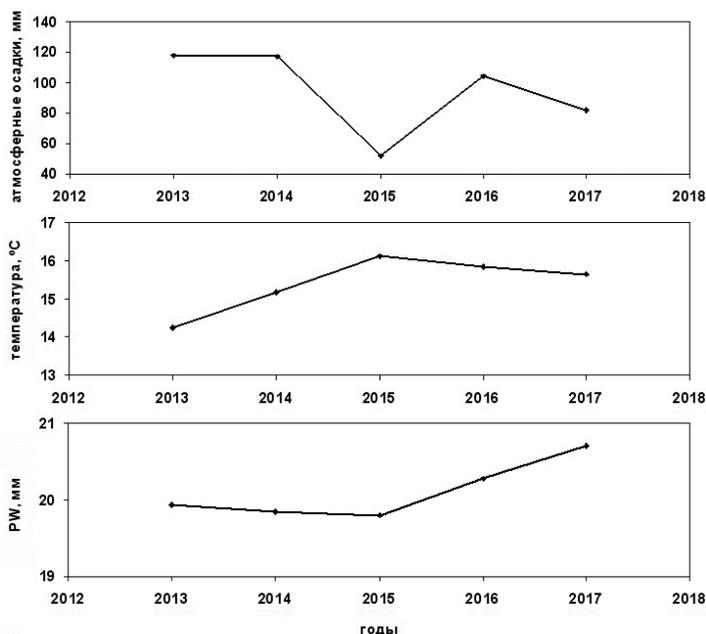


Рис. 7. Графики межгодовых суммарных значений атмосферных осадков и усредненные за сутки значения приземной температуры воздуха и уровня влагосодержания тропосферы над пунктом наблюдения Усть-Баргузин в летний период с 2013 по 2017 г.

Заключение

Определены количественные характеристики значений полной тропосферной зенитной задержки ZTD , ее «влажной» компоненты ZWD и уровня влагосодержания в виде осаждаемой воды PW для пункта наблюдения Усть-Баргузин в течение 2013–2017 гг. В теплое время года (май – сентябрь) данные по ZWD и PW имеют высокий коэффициент взаимной корреляции, достигающий 0,93. В более холодное время года (октябрь – апрель) существенную роль в формировании ZTD начинает играть атмосферное давление, которое в этот период имеет большую вариативность. Применение технологии спутникового зондирования атмосферы NOAA и данных запусков метеорологических зондов для вертикального профилирования температуры воздуха до уровней нижней части стратосферы (до 40 км) позволили получить линейную и квадратичную регрессии соотношений приземной темпе-

ратуры T и средневзвешенной температуры T_m по вертикальным значениям упругости водяного пара. Рассмотрено сравнение количества атмосферных осадков с 2013 по 2017 г. в летний период со среднесуточными значениями приземной температуры воздуха и уровней влагосодержания тропосферы над пос. Усть-Баргузин. Сравнение вариаций ZWD и PW с атмосферными осадками в течение всего пятилетнего периода над пунктом наблюдения Усть-Баргузин показало закономерный рост уровней ZWD и PW накануне выпадения осадков. Использование радиофизических данных по тропосферной задержке сигналов (ZTD), полученных, например, посредством GPS-измерений, позволит улучшить систему краткосрочного прогноза погоды, а также проводить исследования в области атмосферной циркуляции воздуха и влагосодержания тропосферы.

Список литературы

- Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Ч. 2: Долговременные вариации повторяемости ситуаций блокирования и их связь с изменением климата в Азии / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, Е. В. Девятова, Ю. В. Мартынова // *Метеорология и гидрология*. 2018. Т. 43, № 3. С. 16–28. <https://doi.org/10.3103/S1068373918030020>.
- Диагностика содержания атмосферного водяного пара по данным GPS-измерений / М. Г. Дембелов, Ю. Б. Башкуев, А. В. Лухнев, О. Ф. Лухнева, В. А. Саньков // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28, № 2. С. 172–177. <https://doi.org/10.1134/S1024856015040053>
- Кашкин В. Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26, № 10. С. 908–916. <https://doi.org/10.1134/S1024856014010059>
- Кашкин В. Б., Владимиров В. М., Клыков А. О. Оценка тропосферной задержки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2014. № 5. С. 37–42.
- Марченко О. Ю., Мордвинов В. И., Антохин П. Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенга // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 12. С. 1084–1090.
- Хуторова О. Г., Хуторов В. Е., Тептин Г. М. Межгодовая изменчивость приземного и интегрального влагосодержаний на территории Европы и атмосферная циркуляция // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 31, № 6. 2018. С. 432–437. <https://doi.org/10.15372/AOO20180602>
- Benevides P., Catalao J., Miranda P. M. A. On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. Vol. 15. P. 2605–2616.
- Bevis M., Businger S., Chriswell S. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water // *Journal of Applied Meteorology*. 1994. Vol. 33. P. 379–386.
- Caldas-Alvarez A., Khodayar S., Bock O. GPS – Zenith Total Delay assimilation in different resolution simulations of a heavy precipitation event over southern France // *Advances in Science and Research*, 2017. Vol. 14. P. 157–162. <https://doi.org/10.5194/asr-14-157-2017>
- Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on the estimates on baseline lengths / J. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, G. Elgered // *Radio Science*. 1985. Vol. 20, N 6. P. 1593–1607.
- GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system / M. Bevis, S. Businger, T., Herring C. Rocken, R. A. Anthes, R. H. Ware // *J. of Geoph. Res.* 1992. Vol. 97, N d14. P. 15787–15801.
- Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // Henriksen, *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*. Geophys. Monogr. Ser. AGU. Washington. D. C. 1972. Vol. 15. P. 247–251.
- Smith E. K., Weintraub S. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // *Proceedings of the institute of Radio Science*. 1953. Vol. 41. P. 1035–1037.

Moisture Content of the Troposphere Above the Observation Point Ust-Barguzin

M. G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude

M. E. Ovdin

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude

Joint Directorate of Barguzin State Natural Biosphere Reserve and Transbaikal National Park, Ust-Barguzin

Abstract. The moisture content of the troposphere above the point of observation of Ust-Barguzin in the period from 2013 to 2017 is considered. To study the moisture content of the troposphere, the data of surface meteorological measurements as well as vertical atmospheric profiling carried out by radiosonde and satellite soundings of the NOAA polar-orbital system are used. Results of vertical profiling allow obtaining meteorological data at different altitude levels. The regression of the dependence of the values of the weighted «mean temperature» on the aqueous tension on the values of the surface air temperature for Ust-Barguzin according to soundings for 2013–2017 is revealed. The parameters of the total zenith tropospheric delay (ZTD) which is the sum of «dry» or hydrostatic (ZHD) and «wet» (ZWD) components are calculated. The values of ZWD determine the amount of integrated water vapor (IWV) and the amount of potentially precipitated water (PW) above the observation point. The possibility of obtaining initial data for creating new numerical models of zenith tropospheric delay and integrated precipitated water vapor for meteorological problems is considered.

Keywords: meteorological data, vertical sounding of the atmosphere, refractive index, tropospheric delay, moisture content.

For citation: Dembelov M. G., Ovdin M. E. Moisture Content of the Troposphere Above the Observation Point Ust-Barguzin. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2019, vol. 27, pp. 32–45. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.32> (in Russian)

References

- Antokhina O.Y., Antokhin P.N., Devyatova E.V., Martynova Y.V. Atmospheric blockings in Western Siberia. Part 2. Long-term variations in blocking frequency and their relation with climatic variability over Asia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, vol. 43, no. 3, pp. 143-151. <https://doi.org/10.3103/S1068373918030020>
- Dembelov M.G., Bashkuev Y.B., Likhnev A.V., Likhneva O.F., San'kov V.A. Diagnostics of atmospheric water vapor content according to GPS measurements. *Atmospheric and oceanic optics*, 2015, vol. 28, no. 4, pp. 291-296. <https://doi.org/10.1134/S1024856015040053>
- Kashkin V.B. Internal gravity waves in troposphere. *Atmospheric and oceanic optics*, 2014, vol. 27, no. 1, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1134/S1024856014010059>
- Kashkin V.B., Vladimirov V.M., Klykov A.O. *Otsenka troposfernoy zaderzhki signalov globalnykh navigatsionnykh sputnikovyykh system* [Estimation of the tropospheric signals delay of global navigation satellite systems]. *Uspehi sovremennoy radioelektroniki*. [Successes of modern radio electronics], 2014, no. 5, pp. 37-42. (in Russian)
- Marchenko O.Yu., Mordvinov V.I., Antokhin P.N. *Issledovaniye dolgovremennoy izmenchivosti I usloviy formirovaniya atmosferykh osadkov v basseynе reki Selenga* [Study of long-term variability and conditions of precipitation formation in the Selenga river basin]. *Optika atmosfery i okeana*. [Atmospheric and oceanic optics], 2012, vol. 25, no. 12, pp. 1084-1090. (in Russian)
- Khutorova O.G., Khutorov V.E., Teptin G.M. *Mezhdogovaya izmenchivost prizemnogo I inegralnogo vlagosoderzhaniy na territorii Evropy I atmosferykh tsirkulyatsiya* [Inter-annual variability of surface and integral water contents on a territory of Europe and atmospheric cir-

culation]. *Atmospheric and oceanic optics*, 2018, vol. 31, no. 6, pp. 432-437. <https://doi.org/10.15372/AOO20180602> (in Russian)

Benevides P., Catalao J., Miranda P. M. A. On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, vol. 15, pp. 2605-2616.

Bevis M., Businger S., Chriswell S. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, vol. 33, pp. 379-386.

Caldas-Alvarez A., Khodayar S., Bock O. GPS – Zenith Total Delay assimilation in different resolution simulations of a heavy precipitation event over southern France // *Advances in Science and Research*, 2017, vol. 14, pp. 157-162. <https://doi.org/10.5194/asr-14-157-2017>

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.

Bevis M., Businger S., Herring T., Rocken C., Anthes R.A. Ware R.H. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 1992, vol. 97, no. d14, pp. 15787-15801.

Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *Henriksen, The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Geophys. Monogr. Ser. AGU. Washington. D.C.* 1972, vol. 15, pp. 247-251.

Smith E.K., Weintraub S. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proceedings of the institute of Radio Science*, 1953, vol. 41, pp. 1035-1037.

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
тел.: (3012) 43-32-10
e-mail: mdembelov@mail.ru

Dembelov Mikhail Georgievich

Candidate of Science (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
tel.: (3012) 43-32-10
e-mail: mdembelov@mail.ru

Овдин Михаил Евгеньевич

научный сотрудник, лаборатория
электромагнитной диагностики
Институт физического материаловедения
СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой, 6
тел.: (3012) 43-32-10
директор
Объединенная дирекция Баргузинского
государственного природного биосферного
заповедника и Забайкальского
национального парка
Россия, 671623, пос. Усть-Баргузин,
ул. Ленина, 71
тел.: (30131) 91-5-75
e-mail: mikhovdin@mail.ru

Ovdin Mikhail Evgenievich

Research Scientist
Laboratory of Electromagnetic Diagnostics
Institute of Physical Materials Science SB
RAS
6, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047,
Russian Federation
tel.: (3012) 43-3210
Director
Joint Directorate of Barguzin State Natural
Biosphere Reserve and Transbaikalian
National Park
71, Lenin st., Ust-Barguzin, 671623,
Russian Federation
tel.: (30131) 91-5-75
e-mail: mikhovdin@mail.ru

Дата поступления: 26.12.2018

Received: December, 26, 2018