

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.413.2, 551.510.412

Изотопический состав водяного пара в тропосфере в окрестностях Санкт-Петербурга

Я.А. Виролайнен[✉], К.А. Шпак*

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Поступила в редакцию 3.04.2023 г.;

после доработки 15.05.2023 г.;

принята к печати 23.05.2023 г.

Водяной пар играет ключевую роль в целом ряде климатообразующих процессов на различных высотах земной атмосферы. Мониторинг изотопологов водяного пара позволяет получать информацию об атмосферном гидрологическом цикле и исследовать процессы, связанные с испарением и конденсацией, определяющие влажность в тропосфере и водный обмен между тропосферой и стратосферой. Впервые проанализированы временные вариации общего содержания изотопологов водяного пара (H_2O и δD) за 2009–2020 гг. на основе результатов наземных измерений солнечного ИК-излучения Фурье-спектрометром Bruker IFS 125HR в Петергофе. Максимальные значения H_2O и δD приходится на летний период, минимальные – на зимний, при этом наибольшая изменчивость H_2O наблюдается в летние, а δD в зимние месяцы, что обусловлено климатическими особенностями Санкт-Петербурга, т.е. происхождением и историей приходящих воздушных масс. Банк данных изотопического состава водяного пара в окрестностях Санкт-Петербурга может быть использован в моделях общей циркуляции атмосферы с целью повышения точности прогнозирования погоды и долгосрочных изменений регионального климата.

Ключевые слова: водный цикл, наземная ИК–Фурье-спектроскопия, изотопический состав водяного пара; water vapor cycle, ground-based IR Fourier spectroscopy, isotopic composition of water vapor.

Введение

Водяной пар – это важнейший естественный парниковый газ. Он играет важную роль в переносе скрытой теплоты, формировании глобального гидрологического цикла и различных химических процессах. В тропосфере водяной пар во многом определяет качество воздуха и окислительные процессы, влияет на размер, состав, оптические свойства водорастворимого аэрозоля и радиационный баланс атмосферы. Кроме того он в значительной степени определяет образование облачности – основного параметра, формирующего погоду и климат нашей планеты. Точные измерения общего содержания водяного пара являются достаточно трудными в связи с его большими пространственными и временными вариациями, достигающими нескольких порядков, а также большими вариациями давления и температуры в земной атмосфере [1]. Наличие одних только измерений общего содержания водяного пара недостаточно для понимания сложных процессов переноса тропосферной влаги и их связи с атмосферной циркуляцией, что представляет проблему при моделировании климатической системы [2].

Исследование изотопического состава водяного пара может помочь усовершенствовать прогнози-

рование погодных явлений за счет улучшения понимания механизмов нагрева атмосферы и крупномасштабной циркуляции. Например, спутниковые измерения содержания изотопологов (далее для краткости в некоторых случаях будем опускать слово «содержание») воды могут повысить точность данных по полям ветра, влажности и температуры на 3–4% по сравнению с использованием обычных неизотопных наблюдений [3]. Поскольку изотопологи воды различаются физико-химическими свойствами (массой, молекулярной симметрией и др.), во время фазовых переходов воды они ведут себя по-разному. Так, в начале испарения легкие молекулы быстрее переходят из жидкой фазы в газовую. Относительное содержание изотопологов водяного пара в конкретной воздушной массе зависит от температуры и относительной влажности в исходной области, изотопного состава исходной воды, всей истории переноса воздушной массы, включая все события испарения, конденсации и смешивания. Это позволяет использовать измерения изотопологов водяного пара для исследования гидрологического цикла и для оценки и дальнейшего развития моделей глобальной и региональной атмосферной циркуляции [4].

Измерения изотопологов водяного пара и в особенности их соотношений, например $\delta^{18}O$ и δD (через δ выражается отношение рассматриваемого изотополога к основному изотопологу водяного пара

*Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru);
Кристина Андреевна Шпак (k.shpak@spbu.ru).

H_2^{16}O , далее просто H_2O — см. формулу (1)), является нетривиальной задачей. В сравнении с сильной изменчивостью H_2O соотношения изотопологов меняются мало, поэтому методы, используемые для их измерений, должны, с одной стороны, обладать высокой чувствительностью во всех диапазонах изменчивости H_2O , а с другой — быть настолько точными, чтобы улавливать слабые сигналы второстепенных изотопологов водяного пара. В прошлом таким требованиям удовлетворяли только локальные прямые измерения.

Систематический мониторинг содержания изотопологов водяного пара в тропосфере был начат в 1961 г. в рамках программы GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation, http://www-paweb.iaea.org/nares/ih/IHS_resources_gnip.html). Десять лет спустя [5] были проведены первые самолетные измерения профилей изотопологов водяного пара. Из-за сложного и трудоемкого процесса проведения локальных измерений и калибровки приборов число измерительных кампаний было невелико (например, [6]). В последнее время были разработаны новые методы и приборы для дистанционных (спутниковых и наземных) спектроскопических измерений изотопического состава водяного пара. Спутниковые приборы ACE-FTS, SMR и MIPAS позволили получить информацию о δD в нижней стратосфере — верхней тропосфере [7, 8]. В работах [9] и [10] представлены данные первых измерений вертикального распределения δD с использованием спутниковых приборов TES и SCIAMACHY соответственно. Также измеряются вертикальные профили средневзвешенного содержания δD в атмосферном столбе с помощью японского спутника GOSAT [11]. В [12] приведены примеры определения профиля δD по результатам измерений спутникового ИК-спектрометра TANSO-FTS/ GOSAT-2. Исследования одновременных измерений содержания H_2O и δD в тропосфере с помощью прибора IASI представлены, например, в [13, 14]. Измерения изотопологов водяного пара также начаты с помощью спутникового прибора TROPOMI [4, 15].

Любые спутниковые измерения требуют постоянной валидации в различных регионах земного шара с помощью независимых наземных наблюдений. Методы дистанционного зондирования δD и $\delta^{18}\text{O}$ с использованием наземных ИК-Фурье-спектрометров (ФС), функционирующих на станциях наземной наблюдательной сети NDACC, были разработаны в рамках международного проекта MUSICA [14, 16–18]. В настоящее время эти исследования осуществляются только на 12 наземных станциях сети NDACC, а также на 19 станциях сети TCCON, представляющих различные геофизические регионы: полярные и средние широты, субтропики и тропики. На территории России на регулярной основе такие измерения не проводятся.

В Уральском федеральном университете была создана лаборатория физики климата и окружающей среды, одна из задач которой — изучение изотопического состава водяного пара в Западной Си-

бири. В основном в этой лаборатории проводятся локальные измерения на ст. Кауровка, дистанционные же измерения изотопологов водяного пара были выполнены только отдельными сериями [19–21]. Спектральный комплекс на основе ФС Bruker IFS 125HR, осуществляющий с 2009 г. регулярные измерения солнечного излучения на ст. St. Petersburg в Петергофе (59,88° с.ш., 29,82° в.д., 20 м н.у.м.) и сертифицированный в 2016 г. в международной измерительной сети NDACC, является эталоном для калибровки и оценки точности других средств измерения общего влагосодержания [22, 23]. Комплекс может быть использован для исследования изотопического состава водяного пара на территории Европейской части России, в частности в Санкт-Петербурге.

Цель данной работы — проанализировать изменчивость содержания изотопологов водяного пара и создать их архив, который может быть использован, например, в расчетах климатологических средних величин, для уточнения атмосферных моделей, в дальнейшем исследовании водного цикла, процессов облакообразования и т.д. в районе Санкт-Петербурга.

ИК спектроскопические измерения изотопологов водяного пара

В сравнении с сильной изменчивостью содержания H_2O в тропосфере соотношения водных изотопологов относительно неизменны, что делает их измерение непросто задачей: измерительные приборы должны иметь высокую чувствительность к вариациям содержания отдельных изотопологов водяного пара во всем диапазоне изменчивости атмосферного влагосодержания. Соотношения изотопологов водяного пара обычно (см., например, [21, 24]) описываются через δ^x :

$$\delta^x = 1000\text{‰} \left(\frac{R_{\text{sample}}^x}{R_{\text{standart}}^x} - 1 \right). \quad (1)$$

Здесь через R_{sample}^x выражается отношение содержания изотополога водяного пара к содержанию основного изотополога, а через R_{standart}^x — их стандартное отношение, так называемый стандарт средней океанской воды SMOW. Так, для $\frac{\text{HD}^{16}\text{O}}{\text{H}_2^{16}\text{O}}$

$$\text{SMOW} = 155,95 \cdot 10^{-6}, \quad \text{для} \quad \frac{\text{H}_2^{18}\text{O}}{\text{H}_2^{16}\text{O}} \quad \text{SMOW} =$$

$= 2005,2 \cdot 10^{-6}$. Высокая точность получения соотношений изотопологов водяного пара ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) в тропосфере стала возможна в последнее время благодаря новым методикам наземных спектроскопических измерений с помощью ФС Bruker IFS 125HR [17, 21, 25]. В целом точность спектроскопических измерений H_2O и HD^{16}O (далее просто HDO) зависит от шума измерений, формы и интенсивности спектральных линий. Изменения содержания H_2O в атмосфере вызывают более значительные

изменения в регистрируемых спектрах, чем изменения содержания HDO. Кроме того, информация об этих изотопологах, содержащаяся в спектрах, приходит с несколько отличающихся высотных диапазонов. Все это приводит к невысокой точности расчета δD напрямую из спектроскопических измерений H_2O и HDO. В работе [25] предложена квазиоптимальная оценка H_2O и δD , основанная на статистическом подходе к оценке логарифмов разностей вертикальных профилей отношения смеси H_2O и HDO. Измеренные спектры анализируются в 10 каналах в области 2650–3050 cm^{-1} . Изотопологи воды определяются по логарифмической шкале, при этом оптимально оценивается вертикальное распределение H_2O и δD . ИК-спектры позволяют определять тропосферные профили H_2O от поверхности до верхней тропосферы (число степеней свободы в измерениях для H_2O составляет $\sim 2,8$) и отличать их от профилей δD (число степеней свободы в спектрах для $\delta D \sim 1,6$).

Для интерпретации результатов ИК-измерений ФС Bruker IFS 125HR мы использовали программное обеспечение PROFFIT96 [26]. В течение дня число измерений солнечных спектров составляло от 1 до 20. Для получения каждого спектра накапливались интерферограммы (до 10 шт.) за 12 мин, которые затем усреднялись и преобразовывались в спектр. Все спектроскопические измерения выполнялись с разностью хода 180 см. Для решения обратной задачи использовались неаподизированные спектры, соответствующие спектральному разрешению 0,005 cm^{-1} .

При обработке спектров задавались профили давления и температуры по данным реанализа NCEP для каждого дня измерений (12:00 UTC), основанные на спутниковых и радиозондовых измерениях [27]. Априорная информация о профилях содержания различных газов, влияющих на перенос излучения в рассматриваемых спектральных интервалах, заимствовалась из данных численной модели WACCM v.6 [28].

На первом этапе анализа мы провели отбор качественных спектров, основанный на предварительно полученных из спектральных измерений значениях средневзвешенных отношений смеси CO_2 [29]. Это возможно, так как содержание в атмосфере углекислого газа достаточно стабильно, его сезонный ход хорошо известен и описывается с помощью стандартных моделей. Именно сопоставление измеренных значений CO_2 с модельными позволяет выявить высокоточные и стабильные спектры [30]. Из всего набора спектров за 2009–2020 гг. были отобраны 4530 измерений за 737 дней. Дальнейшая обработка применялась уже только к этим «верифицированным» спектрам.

К полученным профилям изотопологов водяного пара мы применили апостериорную обработку, скорректировавшую изменчивость и неопределенность соотношений изотопологов так, чтобы на вы-

ходе получились пары $\{H_2O, \delta D\}$, точность определения которых из спектроскопических измерений сопоставима с точностью прямых измерений этих изотопологов и их соотношений. Случайные ошибки измерения H_2O и δD составили 2% и 25% (2,5%) соответственно. Из-за неопределенности задания спектроскопических параметров тонкой структуры полос поглощения изотопологов водяного пара в отдельных случаях систематические погрешности определения H_2O и δD могут достигать 10% и 150% (15%) соответственно [31]. Подробно алгоритм апостериорной обработки данных измерений ФС Bruker IFS 125HR описан в публикациях [15, 31].

Анализ результатов

Разработанная в рамках проекта MUSICA методика получения информации об изотопическом составе водяного пара позволяет анализировать тропосферные профили отдельных изотопологов, восстановленные из спектроскопических измерений. В настоящей работе мы представляем первые результаты анализа временной изменчивости общего содержания изотопологов водяного пара, полученные на ст. NDACC St. Petersburg (данные V001 доступны на сайте <https://www-air.larc.nasa.gov/missions/ndacc/data.html>? MUSICA = musica-list).

На рис. 1 представлен временной ход среднемесячного содержания в атмосфере основного изотополога водяного пара и отношение к нему содержания тяжелой воды, выраженное через δ (см. формулу (1)). Как и на других наземных станциях [16, 31], максимум общего содержания различных изотопологов водяного пара приходится на летний сезон, минимум – на зимний. При этом абсолютные величины H_2O и δD меняются год от года, что говорит о различной истории (источнике, количестве испарений, конденсации и т.д.) воздушных масс, поступающих в Санкт-Петербург. Так, например, в январе 2014 г. величина δD достигла своего абсолютного минимума за рассматриваемый период. Поскольку тяжелая вода при низких температурах конденсируется в первую очередь, то можно предположить, что HDO в этой воздушной массе неоднократно конденсировалась, а сама воздушная масса пришла из холодных регионов. В июле 2016 г. наблюдается наибольший максимум основного изотополога водяного пара, при этом δD остается примерно на том же уровне, что и в другие годы. По всей видимости, воздушная масса прошла небольшой путь от источника (океана) при достаточно высоких температурах, что привело к незначительному числу событий конденсации.

На рис. 2 показан среднесезонный ход общего содержания в атмосфере H_2O и отношения δD за весь рассматриваемый период измерений. Также на рисунке «коридором» показана естественная изменчивость этих величин. Наибольшая изменчивость H_2O

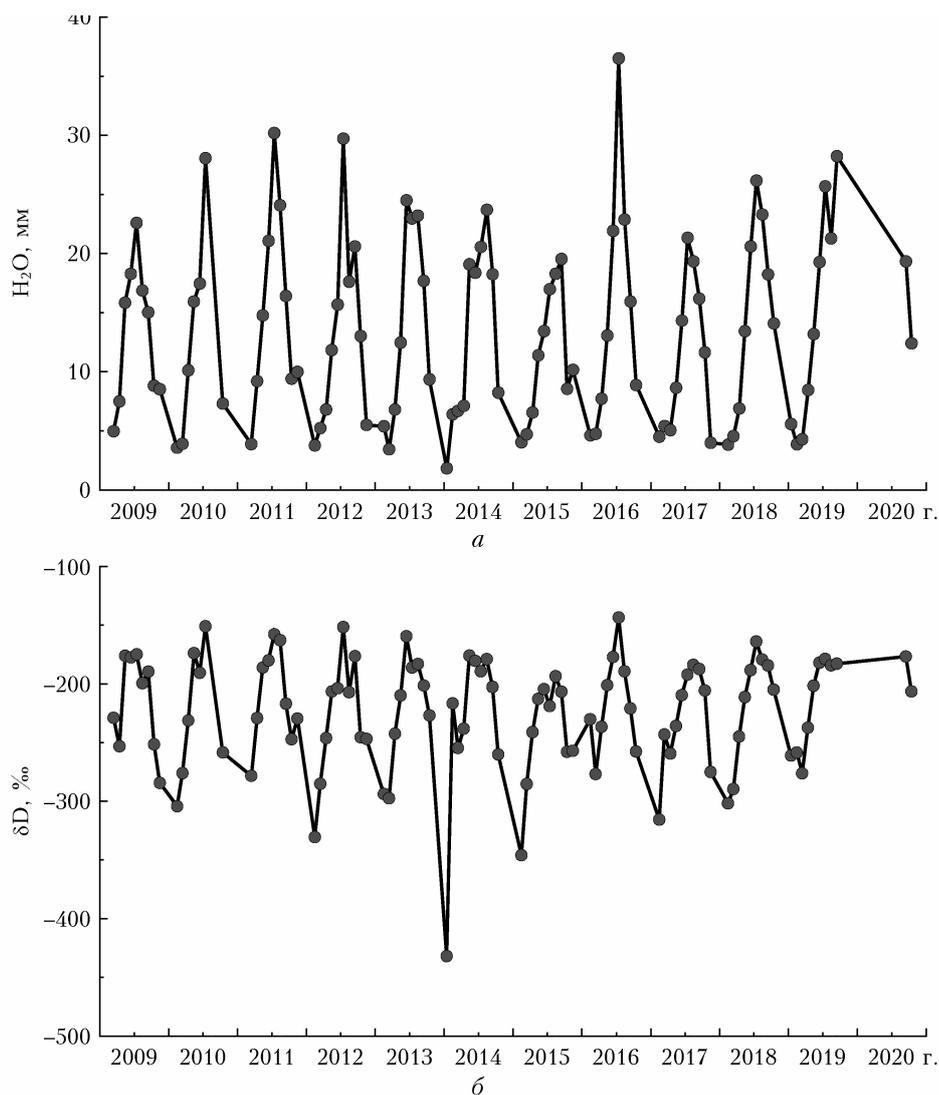


Рис. 1. Временной ход среднемесячных величин общего содержания H_2O (а) и δD (б) в Петергофе

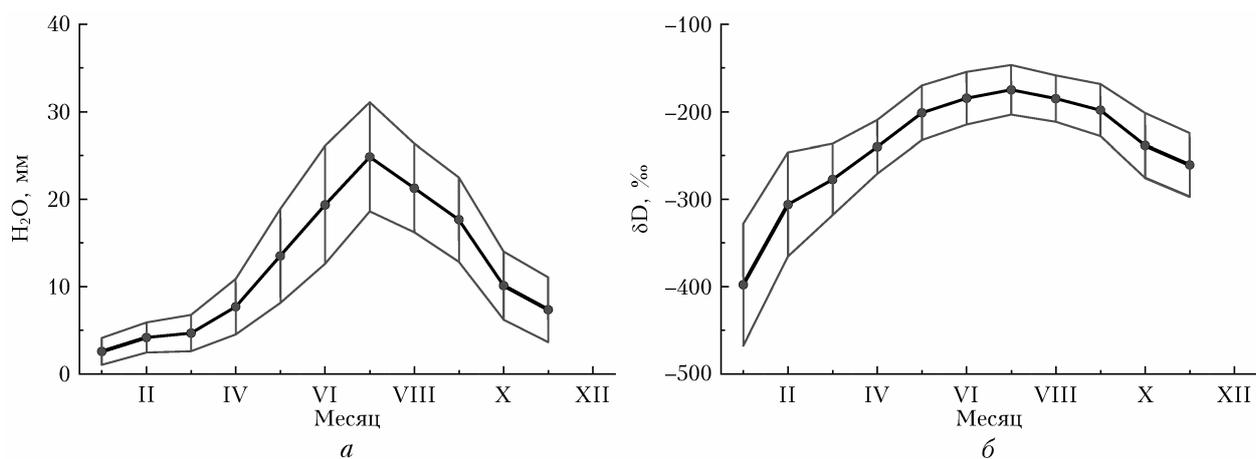


Рис. 2. Сезонный ход общего содержания H_2O (а) и δD (б) в Петергофе за 2009–2020 гг.

наблюдается в июне и июле, максимум среднего влагосодержания приходится на июль. Зимой и в начале весны интегральное содержание H_2O и его изменчивость минимальны.

Максимум изменчивости δD приходится на январь и февраль, что, видимо, обусловлено климатическими особенностями Санкт-Петербурга, когда зимние воздушные массы, приходящие с разных

направлений, достаточно часто сменяют друг друга (циклоническая активность и т.д.). Интегральное содержание δD максимально с мая по сентябрь, его изменчивость в этот относительно теплый и влажный сезон невелика.

В целом к изотопическому обеднению воздушных масс могут приводить различные процессы, например нисходящие опускания ненасыщенных водяным паром масс воздуха вследствие глубокой конвекции в облаках, выпадения осадков, конденсации в облаках в зимний период. К обогащению воздушных масс изотопологами приводят испарение с поверхности воды, мелкомасштабная конвекция в облаках, испарения с поверхности земли и растений.

На полученные результаты также могла оказать влияние геометрия измерений, а именно трасса, вдоль которой формируется регистрируемое ФС Bruker IFS125HR излучение. В работе [22] показано, что в зимнее время прибор направлен вглубь суши, сканируя пограничный слой атмосферы от места положения прибора до расстояния 10–25 км в зависимости от зенитного угла Солнца. Эти воздушные массы обеднены водяным паром. Летом же излучение на прибор проходит через воздушные массы, обогащенные изотопологами воды, находя-

щиеся вблизи станции и акватории Финского залива. Весной прибор направлен чаще в западном направлении, также вдоль акватории Финского залива, осенью — чаще в сторону континентальной части к югу от станции.

На рис. 3 представлены пары $\{H_2O, \delta D\}$ в виде диаграмм рассеяния. Зимой при низком общем влагосодержании процентное отношение в нем тяжелой воды сильно варьируется. Весной при одинаковом содержании H_2O в тропосфере (> 10 мм) содержание δD выше, чем летом и осенью. Это говорит о том, что весной конденсация водяного пара в приходящих в Санкт-Петербург воздушных массах происходит реже.

Результаты измерений на наземных станциях, проанализированных в рамках проекта MUSICA [31], также показали значительное различие между изотопическим составом воздушной массы весной и осенью, наиболее выраженное в арктическом регионе. Так, при переходе от лета к зиме процессы последовательной конденсации приводили к обеднению тропосферы тяжелыми изотопологами, а наступление теплого сезона сопровождается ростом содержания δD за счет испарения.

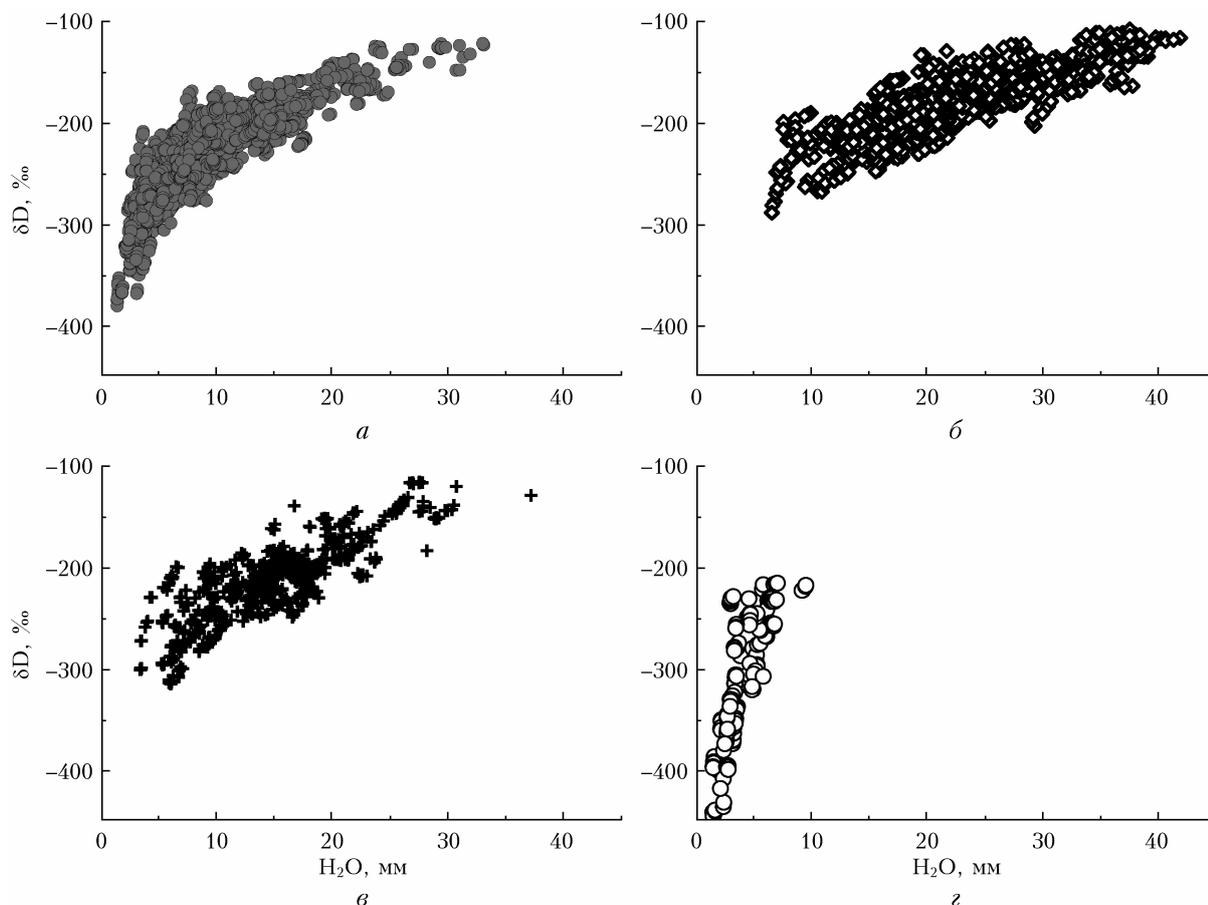


Рис. 3. Диаграммы рассеяния измеренного общего содержания H_2O и δD весной (*a*), летом (*б*), осенью (*в*), зимой (*г*) в Петергофе, 2009–2020 гг.

Заключение

Создан банк данных профилей изотопологов водяного пара, полученных по результатам многолетних наземных дистанционных измерений Фурье-спектрометром Bruker IFS 125HR вблизи Санкт-Петербурга за 2009–2020 гг. Интегральное содержание основного изотополога (H_2O) и фракции тяжелой воды (δD) имеет ярко выраженный сезонный ход с максимальными значениями летом и минимальными зимой. Подобная временная изменчивость изотопного состава водяного пара характерна и для других измерительных станций. Наблюдаемые отклонения от типичных среднемесячных значений обусловлены различной историей зондируемых воздушных масс, а именно процессами конденсации и испарения, произошедшими с ними на пути следования к измерительной станции.

Выявлена наибольшая изменчивость содержания H_2O в июне и июле, а δD – в январе и феврале. При этом наименьшие вариации содержания H_2O наблюдаются в январе, а относительное уменьшение изменчивости δD происходит с мая по сентябрь. Основными факторами, приводящими к различным межсуточным вариациям изотопического состава водяного пара, являются региональные особенности синоптических процессов, в первую очередь перемещение воздушных масс и атмосферных фронтов.

Созданный архив измерений содержания изотопологов водяного пара в районе Санкт-Петербурга может быть использован для валидации спутниковых измерений, уточнения региональных моделей атмосферы, повышения точности прогнозирования метеорологических параметров, а также исследования гидрологического цикла и процессов облакообразования. В дальнейшем мы планируем использовать данный архив совместно с анализом обратных траекторий движения воздушных масс HYSPLIT для поиска связей между относительным изотопическим составом водяного пара и происхождением воздушных масс.

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра научного парка СПбГУ «Геомодель».

Список литературы

1. *Kämpfer N.* Monitoring Atmospheric Water Vapour Ground-Based Remote Sensing and *In-situ* Methods. New York: Springer-Verlag, 2013. 283 p.
2. *Stevens B., Bony S.* What are climate models missing? // *Science*. 31 May 2013. V. 340. P. 1053–1054.
3. *Toride K., Yoshimura K., Tada M., Diekmann Ch., Ertl B., Khosrawi F., Schneider M.* Potential of mid-tropospheric water vapor isotopes to improve large-scale circulation and weather predictability // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. P. e2020GL091698.
4. *Schneider A., Borsdorff T., van de Brugh J., Aemiseger F., Feist D.G., Kivi R., Hase F., Schneider M., Landgraf J.* First data set of $\text{H}_2\text{O}/\text{HDO}$ columns from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 85–100.
5. *Ehhalt D.H.* Vertical profiles of HTO, HDO, and H_2O in the troposphere, NCAR technical note. NCAR-TN-STR-100. 1974. 138 p. DOI: 10.5065/D6BP00QB.
6. *Webster C.R., Heymsfield A.J.* Water isotope map H/D, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ in and out of clouds map dehydration pathways // *Science*. 2003. V. 302. P. 1742–1745.
7. *Payne V.H., Noone D., Dudhia A., Piccolo C., Grainger R.G.* Global satellite measurements of HDO and implications for understanding the transport of water vapour into the stratosphere // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2007. V. 133. P. 1459–1471.
8. *Lossow S., Steinwagner J., Urban J., Dupuy E., Boone C.D., Kellmann S., Linden A., Kiefer M., Grabowski U., Glatthor N., Höpfner M., Röckmann T., Murtagh D.P., Walker K.A., Bernath P.F., von Clarmann T., Stiller G.P.* Comparison of HDO measurements from Envisat/MIPAS with observations by Odin/SMR and SCISAT/ACE-FTS // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 1855–1874.
9. *Worden J., Bowman K., Noone D., and TES team members.* TES observations of the tropospheric HDO/ H_2O ratio: Retrieval approach and characterization // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 11.
10. *Frankenberg C., Yoshimura K., Warneke T., Aben I., Butz A., Deutscher N., Griffith D., Hase F., Notholt J., Schneider M., Schrijver H., Röckmann T.* Dynamic processes governing lower-tropospheric HDO/ H_2O ratios as observed from space and ground // *Science*. 11 September 2009. V. 325, N 5946. P. 1374–1377.
11. *Boesch H., Deutscher N.M., Warneke T., Byckling K., Cogan A.J., Griffith D.W.T., Notholt J., Parker R.J., Wang Z.* HDO/ H_2O ratio retrievals from GOSAT // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2012. V. 5. P. 6643–6677.
12. *Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Имасу Р.* Определение относительного содержания HDO в атмосфере по данным одновременных измерений спутника GOSAT-2 в тепловом и ближнем ИК-диапазонах // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 12. С. 999–1003; *Zadvornyykh I.V., Gribanov K.G., Zakharov V.I., Imasu R.* Retrieval of HDO Relative Content in the atmosphere from simultaneous GOSAT-2 measurements in the thermal and near-IR // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 2. P. 127–131.
13. *Lacour J.-L., Clarisse L., Worden J., Schneider M., Barthlott S., Hase F., Risi C., Clerbaux C., Hurtmans D., Coheur P.-F.* Cross-validation of IASI/MetOp derived tropospheric δD with TES and ground-based FTIR observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 1447–1466.
14. *Schneider M., Berger C., Wiegele A., Hase F., Garcia O.E., Sepúlveda E., Werner M.* MUSICA MetOp/IASI $\{\text{H}_2\text{O}, \delta\text{D}\}$ pair retrieval simulations for validating tropospheric moisture pathways in atmospheric models // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 507–525.
15. *Scheepmaker R.A., van de Brugh J., Hu H., Borsdorff T., Frankenberg C., Risi C., Hasekamp O., Aben I., Landgraf J.* HDO and H_2O total column retrievals from TROPOMI shortwave infrared measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. P. 3921–3937.
16. *Schneider M., Wiegele A., Barthlott S., González Y., Christner E., Dyroff C., Garcia O.E., Hase F., Blumenstock T., Sepúlveda E., Mengistu Tsidu G., Takele Kenea S., Rodríguez S., Andrey J.* Accomplishments of the MUSICA project to provide accurate, long-term, global and high-resolution observations of tropospheric $\{\text{H}_2\text{O}, \delta\text{D}\}$ pairs – a review // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. P. 2845–2875.
17. *Barthlott S., Schneider M., Hase F., Blumenstock T., Kiel M., Dubravica D., Garcia O.E., Sepúlveda E.,*

- Mengistu Tsidu G., Takele Kenea S., Grutter M., Plaza-Medina E.F., Stremme W., Strong K., Weaver D., Palm M., Warneke T., Notholt J., Mahieu E., Servais C., Jones N., Griffith D.W.T., Smale D., Robinson J.* Tropospheric water vapour isotopologue data (H_2^{16}O , H_2^{18}O , and HD^{16}O) as obtained from NDACC/FTIR solar absorption spectra // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. V. 9. P. 15–29.
18. *Wiegele A., Schneider M., Hase F., Barthlott S., Garcia O.E., Sepulveda E., González Y., Blumenstock T., Raffalski U., Gisi M., Kohlhepp R.* The MUSICA MetOp/IASI H_2O and δD products: Characterisation and long-term comparison to NDACC/FTIR data // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 2719–2732.
19. *Грибанов К.Г., Захаров В.И., Береснев С.А., Рокотян Н.В., Поддубный В.А., Имасу Р., Чистяков П.А., Скорик Г.Г., Васин В.В.* Зондирование $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ в атмосфере Урала методом наземных измерений ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 2. С. 124–127; *Gribanov K.G., Zakharov V.I., Beresnev S.A., Rokotyay N.V., Poddubny V.A., Imasu R., Chistyakov P.A., Skorik G.G., Vasin V.V.* Sensing $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ in the Ural's atmosphere using ground-based measurements of IR solar radiation with a high spectral resolution // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 4. P. 369–372.
20. *Gribanov K., Jouzel J., Bastrov V., Bonne J.-L., Breon F.-M., Butzin M., Cattani O., Masson-Delmotte V., Rokotyay N., Werner M., Zakharov V.* Developing a Western Siberia reference site for tropospheric water vapour isotopologue observations obtained by different techniques (*in situ* and remote sensing) // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 5943–5957.
21. *Rokotyay N.V., Zakharov V.I., Gribanov K.G., Schneider M., Breon F.-M., Jouzel J., Imasu R., Werner M., Butzin M., Petri C., Warneke T., Notholt J.* A posteriori calculation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in atmospheric water vapour from ground-based near-infrared FTIR retrievals of H_2^{16}O , H_2^{18}O , and HD^{16}O // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 2567–2580.
22. *Virolainen Ya., Timofeyev Yu., Berezin I., Poberovsky A., Polyakov A., Zaitsev N., Imhasin H.* Atmospheric integrated water vapour measured by IR and MW techniques at the Peterhof site (Saint Petersburg, Russia) // *Int. J. Remote Sens.* 2016. V. 37, N 16. P. 3771–3785.
23. *Virolainen Ya.A., Timofeyev Y.M., Kostsov V.S., Ionov D.V., Kalinnikov V.V., Makarova M.V., Poberovsky A.V., Zaitsev N.A., Imhasin H.H., Polyakov A.V., Schneider M., Hase F., Barthlott S., Blumenstock T.* Quality assessment of integrated water vapour measurements at St. Petersburg site, Russia: FTIR vs. MW and GPS techniques // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 4521–4536.
24. *Galewsky J., Steen-Larsen H.C., Field R.D., Worden J., Risi C., Schneider M.* Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle // *Rev. Geophys.* 2016. V. 54. P. 809–865.
25. *Schneider M., Hase F., Blumenstock T.* Ground-based remote sensing of $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ ratio profiles: Introduction and validation of an innovative retrieval approach // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 4705–4722.
26. *Hase F., Hannigan J.W., Goldmann A., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W.* Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution ground-based FTIR measurements // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2004. V. 87, N 1. P. 25–52.
27. *База данных профилей температуры и геопотенциальных высот NCEP* [Электронный ресурс]. URL: <https://www-air.larc.nasa.gov/missions/ndacc/data.html?NCEP=ncep-list> (last access: 28.03.2023).
28. *Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) Model Output ds313.6* [Электронный ресурс]. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds313.6/#!description> (last access: 28.03.2023).
29. *Виралайнен Я.А.* Методические аспекты определения содержания углекислого газа в атмосфере с помощью ИК-Фурье-спектрометрии // *Журн. прикладной спектроскопии*. 2014. Т. 85, № 3. С. 453–460.
30. *Barthlott S., Schneider M., Hase F., Wiegele A., Christner E., González Y., Blumenstock T., Dohe S., Garcia O.E., Sepulveda E., Strong K., Mendonca J., Weaver D., Palm M., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Lejeune B., Mahieu E., Jones N., Griffith D.W.T., Velasco V.A., Smale D., Robinson J., Kivi R., Heikkinen P., Raffalski U.* Using XCO_2 retrievals for assessing the long-term consistency of NDACC/FTIR data sets // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 1555–1573.
31. *Schneider M., Barthlott S., Hase F., González Y., Yoshimura K., Garcia O.E., Sepulveda E., Gomez-Pelaez A., Gisi M., Kohlhepp R., Dohe S., Blumenstock T., Wiegele A., Christner E., Strong K., Weaver D., Palm M., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Lejeune B., Demoulin P., Jones N., Griffith D.W.T., Smale D., Robinson J.* Ground-based remote sensing of tropospheric water vapour isotopologues within the project MUSICA // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 3007–3027.

Ya.A. Virolainen, K.A. Shpak. Study of the isotopic composition of tropospheric water vapor in the vicinity of St. Petersburg.

Water vapor plays a key role in different climate-forming processes at various altitudes in the Earth's atmosphere. Water vapor isotopologues monitoring provides information on the atmospheric hydrological cycle. It helps to study the processes associated with evaporation and condensation that control the humidity in the troposphere and water exchange between the troposphere and stratosphere. For the first time, temporal variability of water vapor isotopologues (H_2O and δD) in Peterhof in 2009–2020 were analyzed using ground-based measurements of solar IR radiation by the Bruker IFS 125HR Fourier spectrometer. For both H_2O and δD , the maxima occur in summer, the minima – in winter, while the largest variability of H_2O is observed in summer, and δD , in winter months due to the climatic features of St. Petersburg, i.e., the origin and history of incoming air masses. The database of water vapor isotopic composition in the vicinity of St. Petersburg can be used in models of the general circulation of the atmosphere to improve the accuracy of weather forecasting and long-term changes in the regional climate.