

УДК 504.38

Верификация изотопических моделей ЕСНАМ с помощью данных лазерных спектрометров, полученных на двух арктических станциях

Н.Ю. Денисова^{1,2}, К.Г. Грибанов¹, М. Вернер^{3*}

¹Институт естественных наук и математики УрФУ
620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51

²Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 16

³Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера
27570, г. Бремерхафен, Буссеитрассе, 24, Германия

Поступила в редакцию 21.02.2020 г.

Для верификации моделей общей циркуляции атмосферы ЕСНАМ5-wiso и ЕСНАМ6-wiso, дополненных изотопными модулями, было выполнено моделирование в режиме релаксации к известным значениям температуры, давления, скорости и направления ветра, полученным из ретроспективного климатического анализа. Сравнивались результаты моделирования с данными по изотопному составу (δHDO и $\delta\text{H}_2^{18}\text{O}$) водяного пара в атмосферном воздухе у поверхности, полученными на двух станциях мониторинга: в г. Лабьтнанги (66,660° с.ш., 66,409° в.д.) и в г. Игарка (67,453° с.ш., 86,535° в.д.). В настоящей работе принята попытка оценить преимущества более новой модели ЕСНАМ6-wiso по сравнению с ее предыдущей версией ЕСНАМ5-wiso для моделирования изотопного состава воздуха на арктических станциях наблюдения. Результаты моделирования могут быть использованы в качестве априорного ансамбля при решении обратных задач дистанционного зондирования атмосферы на территории Западной Сибири.

Ключевые слова: модель общей циркуляции атмосферы, изотопологи воды; atmospheric general circulation model, water isotopologues.

Введение

Глобальное потепление — одна из основных проблем современности, и ожидается, что наиболее сильно оно проявится в высоких широтах, особенно в арктических широтах Северного полушария [1–3]. Арктические ландшафты особенно чувствительны к изменению температуры из-за тающей вечной мерзлоты [4]. Основной причиной потепления в последние 50 лет, по всей видимости, является рост концентрации парниковых газов, главным образом CO_2 и CH_4 , в атмосфере [5, 6]. Для изучения климатических изменений в субарктических и арктических широтах необходимы детальные модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА), способные прогнозировать метеорологические и другие связанные с ними параметры окружающей среды на десятилетия вперед [7].

Глобальные водный и углеродный циклы — это важные взаимодействующие компоненты климатической системы, в значительной степени контролируемые различными механизмами обратных связей си-

стемы Земли с возмущениями энергетического баланса в тропосфере. Радиационный дисбаланс Земли из-за роста концентраций парниковых газов в атмосфере примерно удваивается при учете сопутствующего роста концентрации водяного пара [8]. В региональном масштабе водный цикл оказывает основное влияние на энергетический баланс подстилающей поверхности посредством скрытых потоков тепла, связанных с испарением и конденсацией. Многие важные процессы гидрологического цикла не наблюдаемы. Например, процессы внутри облака практически недоступны для методов спутникового и наземного дистанционного зондирования. Поэтому относительные содержания изотопологов молекул воды H_2^{18}O и HD^{16}O , обычно обозначаемые как $\delta^{18}\text{O}$ и δD , могут быть использованы в качестве аналитического инструмента для определения различных «скрытых», но ключевых аспектов водного цикла [9]. Символом δ обозначают относительную концентрацию, определяемую как $\delta\text{HDO} =$

$$= \left(\frac{\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}}{(\text{HDO}/\text{H}_2\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \cdot 1000\text{‰},$$
 где химические

формулы — концентрации соответствующих веществ, а индекс SMOW (Standard Mean Ocean Water) относится к среднему значению для океанической воды.

* Нина Юрьевна Денисова (n.denisova@wsibiso.ru); Константин Геннадьевич Грибанов (kgribanov@remotesensing.ru); Мартин Вернер (Martin.Werner@awi.de).

Несколько десятилетий назад использование стабильных изотопологов воды H_2^{18}O и HDO в моделях общей циркуляции атмосферы с учетом их фракционирования при испарении и конденсации вследствие различных масс изотопологов начало активно развиваться как понятный и наиболее продуктивный метод исследования климата. Это было замечено уже в 1964 г., когда W. Dansgaard в своей ранней работе [10] показал основное влияние климатических вариаций на изотопный состав осадков. Он объяснил, как и почему в большинстве регионов Земли изотопный состав осадков линейно связан с локальной температурой (так называемый температурный эффект).

В работах [11–13] было показано, что стабильные изотопы воды являются важным инструментом для палеоклиматических исследований. Они представляют собой общий сигнал среди различных типов естественных климатических архивов, в которых сохранились прошлые изменения гидрологического цикла Земли. Моделирование поведения стабильных изотопологов воды в различных компонентах гидрологического цикла способствует улучшению понимания δ -сигнала в разных естественных архивах данных (например, ледяных ядрах Антарктиды и Гренландии) [14].

Модели ECHAM5 и ECHAM6

Модель ECHAM6 – это на данный момент самая последняя версия модели общей циркуляции атмосферы, созданная в Институте общества Макса Планка в Гамбурге, ее предшественницей является ECHAM5 [15, 16]. Обе модели описывают динамику атмосферы на основе данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Исходный код моделей ECHAM написан на языке программирования Fortran и благодаря модульной структуре допускает модификацию и дополнение новыми моделями процессов. Это обстоятельство позволило дополнить ECHAM5, 6 изотопными модулями, учитывающими фракционирование изотопологов воды, что было сделано в Институте морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (г. Бремерхафен, Германия). Новый модуль получил название wiso, а модели, дополненные им, – ECHAM5-wiso и ECHAM6-wiso [17, 18]. Учет стабильных изотопологов воды H_2^{18}O и HDO встроены в модельный гидрологический цикл [19, 20]. Изотопологи и «нормальная» вода учитываются одинаково, когда не происходят фазовые переходы. Дополнительные процессы фракционирования задаются для переменных модели, отвечающих за содержание изотопологов воды, когда происходит фазовый переход (испарение или конденсация). Многие допущения, сделанные в ECHAM5, 6-wiso, характерны и для других изотопических моделей общей циркуляции атмосферы, таких как CAM [21], HadCM [22], LMDZ [23]. Проект Stable Water Isotope Intercomparison Group (SWING), организованный для срав-

нения таких моделей, показал, что в настоящее время данных наблюдений за изотопами в осадках не всегда достаточно для оценки модельных различий [24]. Изотопический модуль ECHAM5-wiso ранее проходил верификацию в рамках проекта WSibIso в Западной Сибири с использованием данных по изотопному составу осадков [25].

Цель нашей работы – верификация изотопических версий МОЦА ECHAM5-wiso и ECHAM6-wiso для Западной Сибири с использованием данных мониторинга относительного содержания изотопологов водяного пара в приземном слое атмосферы.

Модели могут работать на различных пространственных сетках, таких как T63L47, T63L95, T127L95, что соответствует горизонтальному разрешению $1,9^\circ \times 1,9^\circ$ (T63) и $0,95^\circ \times 0,95^\circ$ (T127) по широте и долготе, 47 или 95 слоям по вертикали между поверхностью и уровнем, соответствующим давлению в 1 гПа. Для запуска кода моделей необходимы входные данные, в том числе начальные и граничные условия. Основные группы таких данных включают в себя начальное состояние атмосферы (завихренность, температура, давление, влажность), параметры поверхности (альbedo, ландшафт, форма границы суши и океана, влажность почвы и т.д.), средние температуры поверхности суши и океанов за как можно более длительный период, предшествующий периоду моделирования, распределение льда в океане, оптические свойства аэрозолей, распределения парниковых газов, распределение озона в атмосфере. Основными уравнениями динамического ядра моделей ECHAM5, 6 являются уравнение Навье–Стокса, уравнение непрерывности, термодинамическое уравнение, применяется гидростатическое приближение. В качестве дискретной вертикальной координаты используется сетка гибридных изобарических сигма-уравнений, когда вертикальная координата, соответствующая поверхностям, огибающим рельеф в нижней атмосфере, плавно переходит к изобарическим поверхностям в верхней части атмосферы. В горизонтальных координатах уравнения решаются с помощью спектрального метода, он позволяет значительно упростить взятие производных. Переменные представлены в виде усеченного ряда сферических гармоник. В моделях ECHAM5, 6-wiso также учитывается фракционирование изотопологов воды при фазовых переходах в облаках и в процессах, когда капли дождя падают через воздух, обедненный тяжелыми изотопологами воды [17].

Станции мониторинга

Станции мониторинга изотопного состава водяного пара организованы Лабораторией физики климата и окружающей среды Института естественных наук и математики УрФУ в сотрудничестве с Институтом экологии растений и животных УрО РАН и Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН на территории стационаров последних:

в Арктическом научно-исследовательском стационаре в г. Лабытнанги (66,660° с.ш., 66,409° в.д.) и в Игарской геокриологической лаборатории в г. Игарке (67,453° с.ш., 86,535° в.д.). Обе станции мониторинга укомплектованы идентичными лазерными спектрометрами Picarro L2130-i, предназначенными исключительно для измерения изотопного состава водяного пара в воздухе или чистом азоте. Спектрометры периодически калибруются по стандартным образцам жидкой воды, которые дозируются в испаритель, где смешиваются с осушенным колонной с сорбентом атмосферным воздухом и подаются в анализатор. Обе станции также укомплектованы автоматическими метеостанциями (Vaisala WXT520). Их работа контролируется через Интернет. Воздух отбирается с верхушки мачт (8 м в г. Лабытнанги и 15 м в г. Игарке) в периоды исправности всего оборудования и при наличии электропитания, анализ осуществляется непрерывно с измерением содержания изотопологов воды примерно один раз в 1–5 с. Пункты мониторинга расположены на берегах рек Оби и Енисея, что вызывает возмущение данных из-за подмешивания водяного пара непосредственно с водной поверхности рек в теплый период года.

Сравнение результатов моделирования с данными наблюдения

Для верификации моделей ECHAM5-wiso и ECHAM6-wiso выполнено сравнение среднесуточных данных по изотопному составу водяного пара в атмосферном воздухе у поверхности, измеренному на станциях мониторинга, с результатами моделирования.

Моделирование выполнялось в следующем режиме: для ECHAM5-wiso спектральное разрешение T106 (соответствует пространственной сетке 1,125° × 1,125°), временной шаг 6 мин, начало – 1 ян-

варя 2011 г., окончание – 31 января 2016 г., режим релаксации к известным из ретроспективного климатического анализа полям температуры, давления, дивергенции и завихренности ветра. Для релаксации применяли данные ретроспективного анализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA-Interim [25]. Модельный эксперимент был проведен с помощью суперкомпьютера «Уран» Института математики и механики им. Красовского УрО РАН.

Для модели ECHAM6-wiso: спектральное разрешение T63 (соответствует пространственной сетке 1,88° × 1,88°), временной шаг 6 мин, начало – 1 января 2010 г., окончание – 31 января 2017 г., режим релаксации к известным полям температуры, давления, дивергенции и завихренности ветра, взятым из данных ретроспективного анализа ERA5 [26]. Был использован суперкомпьютер Ollie Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера.

На рис. 1 приведен пример временного ряда δHDO по данным измерений, выполненных в г. Игарке, и результатам модельных экспериментов.

Диаграммы рассеяния для г. Игарка (рис. 2) показывают лучшее совпадение результатов моделирования при использовании модели ECHAM6-wiso по сравнению с ECHAM5-wiso. Однако для г. Лабытнанги (рис. 3) ситуация обратная. Это может быть связано с более низким горизонтальным разрешением в вычислительном эксперименте на модели ECHAM6-wiso, а также с тем, что нижний уровень атмосферы в модельных расчетах составляет ~100 м, в то время как измерения производятся у поверхности. Кроме того, вблизи станции наблюдения в г. Лабытнанги расположена газовая котельная, выбросы водяного пара из трубы которой оказывают возмущающий эффект на результаты измерений. В настоящей работе отбор данных по направлению ветра не проводился вследствие того, что периоды отказа автоматической метеостанции существенно длиннее периодов отказа спектрометра, размещенного в теплом помещении.

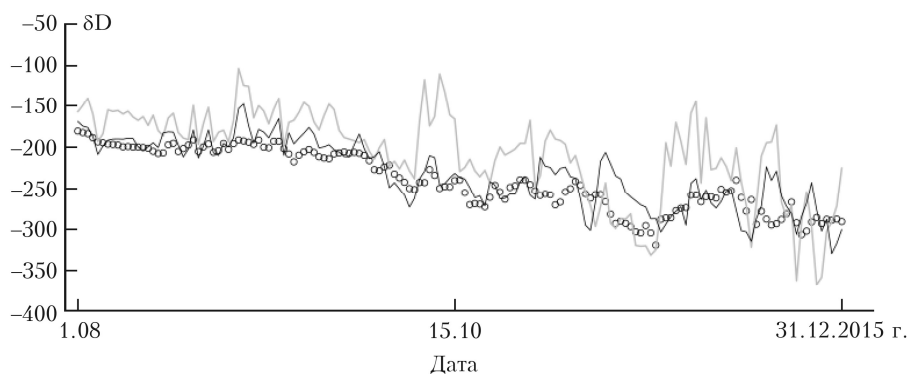


Рис. 1. График зависимости δHDO от времени в г. Игарке за 2015 г. по данным прямых измерений (кружки) и по расчетам моделей ECHAM5-wiso (серая кривая) и ECHAM6-wiso (черная кривая)

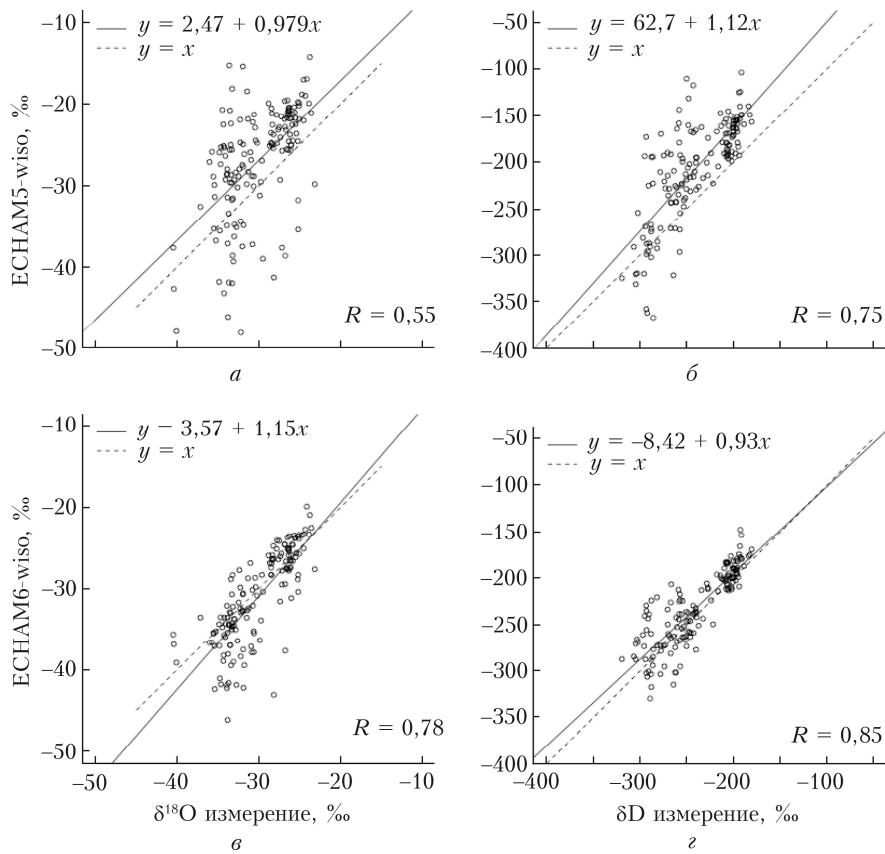


Рис. 2. Диаграммы рассеяния для станции в г. Игарке

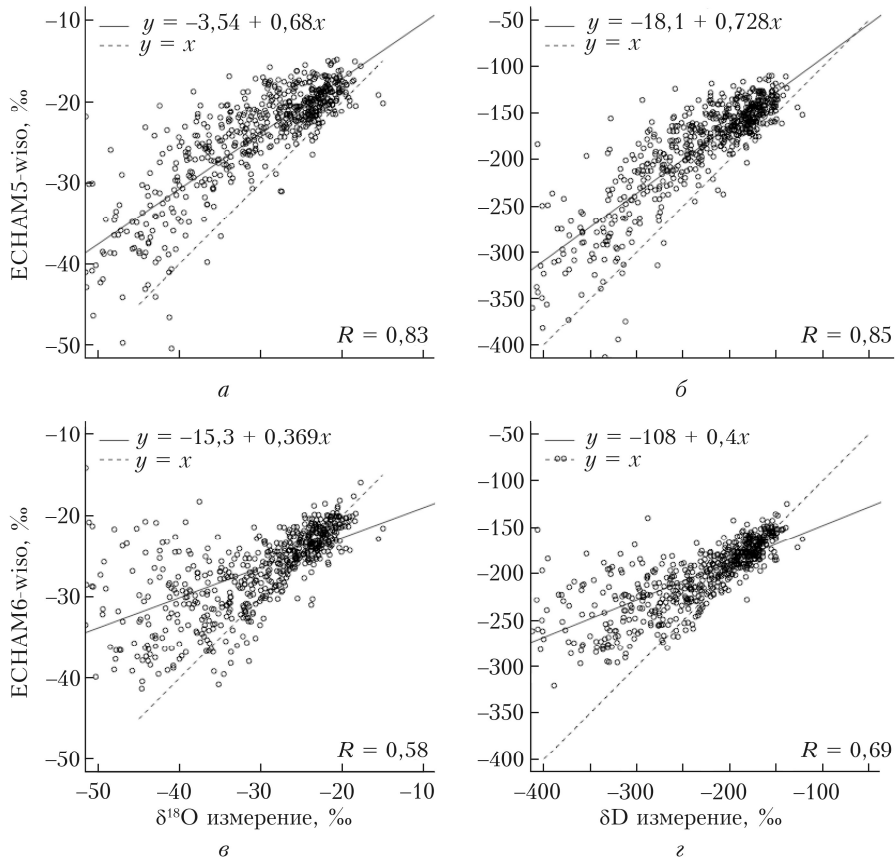


Рис. 3. Диаграммы рассеяния для станции в г. Лабитнанги

Заключение

Полученные результаты говорят о том, что обе модели в целом отражают сезонные вариации изотопного состава водяного пара в атмосферном воздухе обеих станций мониторинга. Использовались два сочетания модель–реанализ. Более новая модель ECHAM6-wiso с данными нового реанализа ERA5 продемонстрировали лучшее воспроизведение среднесуточных данных измеренных в г. Игарке, в то время как их предшественники ECHAM5-wiso и ERA-Interim продемонстрировали лучшее совпадение с данными для г. Лабитнанги. Это означает, что выбор модели и реанализа для получения модельных данных, пригодных для дальнейшего использования, требует дополнительных вычислительных экспериментов с подбором пространственного разрешения и других параметров запуска, с возможной фильтрацией данных по направлению ветра от локальных источников. Поскольку результаты вычислительных экспериментов предоставлены с глобальным покрытием и на всей вертикальной сетке модели, эти данные могут быть использованы в качестве априорного ансамбля в задачах дистанционного зондирования вертикального распределения изотопологов воды в атмосфере (см., например, [27–29]).

Работа выполнена в рамках исследований при финансовой поддержке РНФ (грант № 18-11-00024). Авторы выражают благодарность В.Г. Штро, Н.Л. Коневши за поддержание в работоспособном состоянии оборудования станций мониторинга в г. Лабитнанги и г. Игарка.

1. *Мохов И.И.* Изменения климата в Арктике // Земля и вселенная. 2006. № 2. С. 34–40.
2. *Караханян А.А.* Долговременные изменения атмосферной циркуляции и климата на территории Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1104–1106.
3. *Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М.* Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 403–421.
4. *Callaghan T.V., Jonasson S.* Arctic terrestrial ecosystems and environmental change // Philos. Trans. Roy. Soc. London. 1995. N 352. P. 259–276.
5. *Dlugokencky E.J., Masarie K.A., Lang P.M., Tans P.P.* Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden // Nature. 1998. N 393. P. 447–450.
6. *Будыко М.И.* Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 362 с.
7. *Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 66–79.
8. *Held I.M.* Robust responses of the hydrological cycle to global warming // J. Clim. 2006. V. 19, iss. 21. P. 5686–5699.
9. *Schmidt G. A., Hoffmann G., Shindell D. T., Hu Y.* Modeling atmospheric stable water isotopes and the potential for constraining cloud processes and stratosphere-troposphere water exchange // J. Geophys. Res. 2005. N 110. P. D21314.
10. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16, N 4. P. 436–468.
11. *Jouzel J., Alley R.B., Cuffey K.M., Dansgaard W., Grootes P., Hoffmann G., Jonsen S.J., Koster R.D., Peel D., Shuman C.A., Stievenard M., Stuiver M., White J.W.* Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores // J. Geophys. Res. 1997. N 102 (C12). P. 26471–26487.
12. *Sturm C., Zhang Q., Noone D.* An introduction to stable water isotopes in climate models: Benefits of forward proxy modelling for paleoclimatology // Clim. Past. 2010. N 6. P. 115–129.
13. *Поляков В.А., Ферронский В.И.* Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
14. *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, iss. 4. P. 809–865.
15. *Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Brinkop S., Dümenil L., Esch M., Kirk E., Lunkeit F., Ponater M., Rockel B., Sausen R., Schleese U., Schubert S., Windelband M.* Simulation of the present-day climate with the ECHAM model: Impact of model physics and resolution. Hamburg: Max Planck Institute for Meteorology, 1992. 110 p.
16. *Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblüeh L., Manzini E., Rhodin A., Schleese U., Schulzweida U., Tompkins A.* The general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. Hamburg: Max Planck Institute for Meteorology, 2003. 127 p.
17. *Werner M., Langebroek P.M., Carlsen T., Herold M., Lohmann G.* Stable water isotopes in the ECHAM5 general circulation model: Towards high-resolution isotope modeling on a global scale // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, N D15109.
18. *Cauquoin A., Werner M., Lohmann G.* Water isotopes – climate relationships for the mid-Holocene and preindustrial period simulated with an isotope-enabled version of MPI-ESM // Clim. Past. 2019. N 15. P. 1913–1937.
19. *Hoffmann G., Werner M., Heimann M.* Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: A study on timescales from days to several years // J. Geophys. Res. 1998. V. 103(D14). P. 16871–16896.
20. *Hoffmann G., Jouzel J., Masson V.* Stable water isotopes in atmospheric general circulation models // Hydrol. Process. 2000. V. 14, N 8. P. 1385–1406.
21. *Lee J.-E., Fung I., DePaolo D.J., Henning C.C.* Analysis of the global distribution of water isotopes using the NCAR atmospheric general circulation model // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, N D16306.
22. *Tindall J.C., Valdes P.J., Sime L.C.* Stable water isotopes in HadCM3: Isotopic signature of El Niño – Southern Oscillation and the tropical amount effect // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, N D04111.
23. *Risi C., Bony S., Vimeux F., Jouzel J.* Water–stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model: Model evaluation for present-day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, N D12118.
24. *Werner M.* Modelling stable water isotopes: Status and perspectives // EPJ Web Conf. 2010. N 9. P. 73–82.
25. *Butzin M., Werner M., Masson-Delmotte V., Risi C., Frankenberg C., Gribanov K., Jouzel J., Zakharov V.I.*

- Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. N 14. P. 5853–5869.
26. *ERA-Interim*: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter 110, Winter 2006/7 [Electronic resource]. URL: http://old.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/110_rev.pdf (last access: 09.02.2019).
27. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. 2017, updated monthly. ERA5 Reanalysis. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.5065/D6X34W69> (last access: 19.08.2019).
28. *Zakharov V.I., Imasu R., Gribanov K.G., Hoffmann G., Jouzel J.* Latitudinal distribution of the deuterium to hydrogen ratio in the atmospheric water vapor retrieved from IMG/ADEOS data // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N L12104.
29. *Herbin H., Hurtmans D., Clerbaux C., Clarisse L., Coheur P.-F.* H216O and HDO measurements with IASI/MetOp // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. N 9. P. 9433–9447.

N. Yu. Denisova, K.G. Gribanov, M. Werner. **Validation of AGCMs ECHAM using laser spectrometer data obtained at two Arctic stations.**

To validate the atmospheric general circulation models ECHAM5-wiso and ECHAM6-wiso with embedded water isotopic modules, the simulation with nudging to known fields of temperature, pressure, wind speed and direction obtained from retrospective climate analysis was performed. The simulation results were compared with data on the isotopic composition (δHDO and $\delta\text{H}_2^{18}\text{O}$) of water vapor in atmospheric air near the surface obtained at two monitoring stations: in Labytnangi (66.660N, 66.409E) and in Igarka (67.453N, 86.535E). An unambiguous conclusion about the superiority of the newer model ECHAM6-wiso could not be made, because the simulation results with its use demonstrate a better agreement with the values observed in Igarka, while the model ECHAM5-wiso shows a better agreement with the values observed in Labytnangi. The simulation results can be used as an a priori ensemble for solving inverse problems of remote sensing of the atmosphere in Western Siberia.