

весьма ослабленном состоянии, существенно измени траекторию, а скорость ветра в нём не превышала 20 м/с.

Также проводились эксперименты, в которых варьировалась температура поверхности моря.

Литература:

1. Mikhail A. Nikitin, Mikhail M. Chumakov. *Case study of polar lows in Barents and Kara Seas during 2014. Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 14-18 June 2015, Trondheim, Norway / Edited by Ekaterina Kim, Wenjun Lu & Kent V. Hoyland. – Norwegian University of Science and Technology, 2015.*
2. Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М. Идентификация полярных циклонов над акваторией Карского моря с помощью гидродинамического моделирования // Вести газовой науки, 2015, №2, с. 106-112.
3. Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М. Использование прогностической системы COSMO-Ru для исследования свойств полярных циклонов: эпизод 25-27 марта 2014 года // Труды Гидрометцентра России, 2016, вып. 361.
4. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р. М., Алферов Д. Ю., Астахова Е. Д., Блинов Д. В., Бундель А. Ю., Казакова Е. В., Кирсанов А. А., Никитин М. А., Перов В. Л., Суркова Г. В., Ревокатова А. П., Шатунова М. В., Чумаков М. М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология, 2015, № 6, с.58-70.

Mesoscale atmospheric modeling technology as a tool for the long-term meteorological dataset development

¹ Platonov V., ¹ Kislov A., ² Rivin G., ³ Varentsov M., ² Rozinkina I., ² Ninkitin M., ⁴ Chumakov M.

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Hydrometcentre of Russia, Moscow, Russia

³ A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

⁴ Gazprom VNIIGAZ LLC, Russia

E-mail: vplatonov86@gmail.com

The detailed hydrodynamic modelling of meteorological parameters during the last 30 years (1985 – 2014) was performed for the Okhotsk Sea and the Sakhalin island regions. The regional non-hydrostatic atmospheric model COSMO-CLM used for this long-term simulation with ~13.2, ~6.6 and ~2.2 km horizontal resolutions. The main objective of creation this dataset was the outlook of the investigation of statistical characteristics and the physical mechanisms of extreme weather events (primarily, wind speed extremes) formation on the small spatio-temporal scales. The detailed meteorological information is also important since it allows to take into account sea and islands coast configuration, mountain systems and other mesoscale features of surface terrain. This work suggests and describes the downscaling technology for the long-term simulations using three consequent “nesting domain”, shows the results of obtained archive verification, as well as extreme wind velocities estimation.

The COSMO-CLM model (v. 5.0) used as main tool for creation of this long-term meteorological archive. COSMO-CLM is the climate version of the well-known mesoscale COSMO model, including some modifications and extensions adapting to the long-term numerical experiments. The downscaling technique was realized and developed for the long-term simulations with three consequent nesting domains and standard configuration of COSMO-CLM model. ERA-Interim reanalysis (~0.750 degrees resolution) used as global forcing data for the starting domain (~13.2 km horizontal resolution), then these simulation data used as initial and boundary conditions for the next model runs over the domain with ~6.6 km resolution, and similarly, for the next step to ~2.2 km domain. Besides, the COSMO-CLM model configuration for ~13.2 km run included the ‘spectral nudging’ technique, i.e. an additional assimilation of reanalysis data not only at boundaries, but also inside the whole domain. Figure 1 and Table 1 shows the boundaries and main characteristics of used domains. Practically, this computational scheme realized on the SGI Altix 4700 supercomputer system in the Main Computer Center of Roshydromet and used ~2,400 hours of CPU time total. More than 20 meteorological fields were obtained finally over these three domains with 1-hour temporal resolution throughout 30 years.

According to modelling results, the verification of the obtained dataset was performed on the observation data, obtained from “Hydrometcenter database” and www.rp5.ru archive. Estimations for the whole period, all

domains and different seasons showed the mean error -0.5°C , up to $2 - 3^{\circ}\text{C}$ RMSE in temperature (error maxima was during spring and autumn), and overestimation of inland wind speed (RMSE is up to 2 m/s). It's noteworthy that wind gusts were reproduced by model notably good (ME was up to 1 m/s , RMSE was $2 - 3.5\text{ m/s}$, correlation coefficients were 0.8 and more), despite to a fairly simple algorithm [5]. Overall, analysis showed that the used downscaling technique with applying the COSMO-CLM model reproduced the meteorological conditions, spatial distribution, seasonal and synoptic variability of temperature and extreme wind speed for the study area with approximately the same adequate quality. The dependencies between reproduction quality of mesoscale atmospheric circulation features and the horizontal resolution of the model were revealed. In particular, it was shown that $\sim 6.6\text{ km}$ resolution does not give any significant improvement comparing to $\sim 13\text{ km}$ resolution, whereas $\sim 2.2\text{ km}$ resolution provides an appreciable quality enhancement.

Detailed synoptic analysis of extreme wind speed situations identified the two main types of favorable to their genesis. The first one (more frequent) was associated with developing of cyclones over the Japan Islands or the Primorsky Krai of Russia, the subsequent moving the Sakhalin Island, crossing it and coming in the Okhotsk Sea. The second one characterized by penetration of intensified cyclones from Pacific Ocean through the Kamchatka peninsula, Kuril or Japan Islands. Next, the deepening cyclones crossed the Okhotsk Sea and got close to the Sakhalin Island, causing extreme winds offshore.

The obtained high-resolution dataset will continue to be used for a fully and comprehensive analysis of physical mechanisms of extreme weather events, the reproduction quality of hydrometeorological fields, their statistical estimates, climatological trends, using this information for the detailed environment state assessment and many other objectives.

Технология мезомасштабного моделирования как средство создания многолетнего архива метеорологической информации

¹ Платонов В.С., ¹ Кислов А.В., ² Ривин Г.С., ³ Варенцов М.И., ² Розинкина И.А.,
² Никитин М.А., ⁴ Чумаков М.М.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Гидрометцентр России, Москва, Россия

³ Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

⁴ Газпром ВНИИГАЗ, Россия

E-mail: vplatonov86@gmail.com

Впервые в Российской Федерации выполнено гидродинамическое моделирование детализированных полей метеорологических элементов за последние 30 лет (для региона о. Сахалин и акватории Охотского моря) с помощью региональной мезомасштабной негидростатической модели атмосферы (COSMO-CLM) с пространственным разрешением ~ 13 , ~ 6 и $\sim 2\text{ km}$. Основной целью создания архива явилась перспектива исследования статистических характеристик и физических механизмов формирования экстремальных событий (в первую очередь, скоростей ветра) на пространственно-временных масштабах, принципиально улучшающих данные реанализов. Получение детализированной метеорологической информации важно также потому, что позволяет явным образом учесть конфигурацию морского побережья и островов, горные системы и другие мезомасштабные особенности подстилающей поверхности. В данной работе предложена и отработана для длительных численных экспериментов технология даунскейлинга с тремя последовательными «вложенными сетками», представлено описание примененной вычислительной технологии и приведены результаты верификации полученного архива, а также первые оценки расчётов экстремальных скоростей ветра.

В результате расчётов были получены архивы гидрометеорологической информации с пространственным разрешением $\sim 13\text{ km}$, $\sim 6\text{ km}$ за период $1985 - 2014\text{ гг.}$, и, для отдельных экстремальных случаев, с разрешением $\sim 2\text{ km}$, причем результаты каждого эксперимента представляли собой также стартовый архив для последующего моделирования более высокого разрешения.

В качестве основного инструмента создания многолетнего массива метеорологической информации высокого разрешения была выбрана негидростатическая модель COSMO-CLM (версия 5.0). Это климатическая версия региональной мезомасштабной модели COSMO [1], разрабатываемая одноименным консорциумом (Consortium for Small-scale Modeling), включающим в себя национальные службы

прогноза погоды ряда стран, в том числе Росгидромет Российской Федерации. Развитие климатической версии модели осуществляется в рамках международного научного сообщества CLM-Community [2]. Главные отличия климатической версии модели от оперативной заключаются в ряде модификаций и расширений, предназначенных для долговременных численных экспериментов, таких как большая глубина моделируемого слоя подстилающей поверхности и учет сезонного хода ее параметров [3, 4].

Модель COSMO-CLM v.5.0 запускалась в стандартной конфигурации: схема интегрирования по времени Рунге-Кутты с расщеплённым подавлением акустических и гравитационных волн и численной аппроксимацией горизонтальной адвекции 5-го порядка; включёнными диффузией Смагоринского и «спектральным наджингом». Схема параметризации радиации Риттера-Жилейна (Ritter-Geleyn) основана на двухпоточковой версии уравнения радиационного переноса; параметризация осадков описывает льдо- и градообразование в облаках и включает явное воспроизведение глубокой конвекции; влажная и мелкая конвекция параметризуется схемой Тидтке (Tiedtke) потока массы с равновесным замыканием (использовалась при расчётах на разрешении $\sim 2,2$ км); турбулентность описывается одномерной ТКЕ – схемой замыкания 2,5 порядка; схема параметризации переноса в приземном слое, основанная на использовании уравнения для турбулентной кинетической энергии, включает описание процессов в ламинарно-турбулентном слое шероховатости. Более подробное описание модели можно найти на странице ее документации [<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>].

В результате моделирования были получены детализированные поля (методом «вложенных сеток», с горизонтальными разрешениями 13,2, 6,6 и 2,2 км) более 20 метеорологических элементов за последние тридцать лет (1985 – 2014 гг.) с дискретностью архивируемых данных по времени 1 час. Первоначально шёл стандартный модельный расчёт по данным реанализа на область с самым грубым разрешением (13,2 км). Затем эти данные использовались в качестве начальных и граничных условий для интерполяции и дальнейших модельных расчётов на домене с шагом сетки 6,6 км. Они, в свою очередь, представляли собой начальные и граничные условия для области с разрешением 2,2 км. Расчёты по области 2,2 км проводились только для 15 предварительно отобранных случаев экстремальных скоростей ветра за 30-летний период (см. табл. 2).

Практическая реализация данной вычислительной схемы осуществлялась на несколько месяцев (от 3 – 4 месяцев до года), повторяясь для каждого года. Такая продолжительность применялась из-за ограничений вычислительных ресурсов и объёмов хранения данных, а также технических рисков «обрушения» компьютерного эксперимента при непрерывном счете на более продолжительные интервалы времени. Описанная технология была реализована при помощи вычислительной системы SGI Altix 4700 в Главном вычислительном центре Росгидромета России. Для основных расчётов 30-летнего периода на кластере с пиковой производительностью 35 Тфлопс при использовании 288 ядер было использовано ~ 2400 часов процессорного времени, что эквивалентно 100 дням непрерывной работы.

На рис. 1 и в табл. 1 приведены карты границ использованных расчётных доменов и их основные характеристики. Важным фактором при выборе конфигурации области с разрешением 13,2 км послужил учет особенностей атмосферной циркуляции над Дальневосточным регионом. Область 6,6 км (базовая для создаваемого архива) лишь немного меньше домена 13,2 км, в основном за счёт сокращения акваторий Тихого океана и Японского моря. Конфигурация области с разрешением 2,2 км обусловлена тем, что основной задачей расчётов на этом разрешении являлось детальное моделирование экстремальных явлений к северо-востоку от о. Сахалин.

Табл. 1. Основные характеристики расчётных доменов

Характеристика	Домен 13,2 км	Домен 6,6 км	Домен 2,2 км
Долгота смещённого полюса	110° в.д.	110° в.д.	110° в.д.
Широта смещённого полюса	60° с.ш.	60° с.ш.	60° с.ш.
Общее количество точек	145*355 = 51475	228*525 = 119700	300*500 = 150000
Шаг сетки, градусы (км)	0,12° ($\sim 13,2$ км)	0,06° ($\sim 6,6$ км)	0,02° ($\sim 2,2$ км)
Шаг интегрирования по времени, сек	120	60	20
Число модельных уровней в атмосфере	40	40	50
Число модельных уровней в почве	9	9	9

Важной задачей было сравнение результатов мезомасштабного даунскейлинга с данными метеорологических станций наблюдательной сети Росгидромета с целью оценки качества воспроизведения моделью основных метеорологических параметров – в первую очередь, в соответствии с поставленными практическими задачами, скорости ветра.

Данные наблюдений по Российским станциям были получены из базы данных ФГБУ «Гидромет-центр России», также использовались данные архива веб-сайта «Расписание погоды» (www.gp5.ru). Для того, чтобы преимущественно оценивать качество работы модели для прибрежных территорий, были отобраны метеорологические станции, расположенные на расстоянии не более 100 км от берега и на

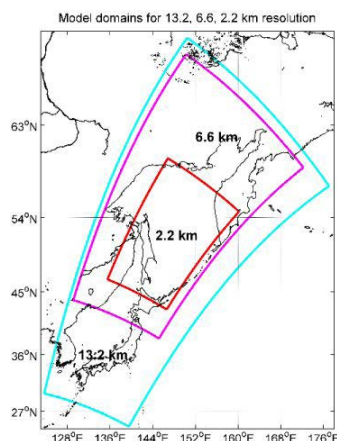


Рис. 1. Карта расположения границ расчётных областей с разрешением 13,2, 6,6 и 2,2 км.

высоте, не превышающей 500 м над уровнем моря (для области ~13,2 км таких оказалось 124, для области ~6,6 км – 50).

Проведенная верификация по многолетним архивам на областях с разрешением 13,2 и 6,6 км для различных сезонов года по основным параметрам – приземной температуре, скорости ветра и порывам ветра – показала вполне удовлетворительные результаты. Так, для температуры средняя ошибка составила порядка 0,5 °C, в то время как стандартное отклонение ошибок достигало 2-3 °C, причём большие значения ошибок характерны для переходных сезонов (весна и осень). Скорость ветра модель завышает во внутренних районах острова и материка, СКО составила около

2 м/с, также с максимумом в переходные сезоны; средняя ошибка не превышала десятых долей м/с. Связано это, скорее всего, с особенностями расположения конкретных метеостанций и неполным соответствием реальной шероховатости подстилающей поверхности и ее значений, используемых моделью. Для прибрежных и островных метеостанций ошибки меньше. Что касается порывов ветра, несмотря на достаточно простой алгоритм расчёта в модели [5], то модель воспроизвела их очень неплохо, со средними ошибками не более 1 м/с, СКО от 2 до 3,5 м/с и коэффициентами корреляции около 0,8 и выше. При этом было показано, что статистически значимого уменьшения ошибок при переходе от разрешения 13,2 км к 6,6 км не происходит. Что касается верификации расчётов случаев экстремальных скоростей ветра, то в абсолютном большинстве случаев ошибки средней скорости и порывов значительно сокращаются при переходе к разрешению 2,2 км, в температуре это проявляется в меньшей степени. Таким образом, в целом можно утверждать, что модель с примерно одинаковым качеством воспроизводит как «фоновую» внутрисезонную изменчивость метеорологических величин, так и их динамику в условиях экстремально высоких скоростей ветра.

Табл. 2. Даты экстремальных синоптических ситуаций в регионе Охотского моря и значения максимальной скорости ветра (м/с), воспроизведенные моделью COSMO-CLM

	Дата	Скорость ветра, м/с		
		13,2 км	6,6 км	2,2 км
1	25.03.1987	27,7	-	-
2	28.01.1989	32,3	34,3	34,3
3	19.12.1989	28,6	-	-
4	8.11.1995	27,0	26,7	27,0
5	1.02.1996	28,3	29,2	28,9
6	14.02.1996	32,8	34,2	34,0
7	28.02.1999	33,3	35,2	35,5
8	14.11.1999	27,4	25,3	28,7
9	11.01.2000	28,3	29,3	29,6
10	12.01.2001	30,8	30,3	30,7
11	5.12.2002	27,7	30,0	29,0
12	8.01.2005	29,8	28,7	30,6
13	27.02.2006	28,9	29,0	30,6
14	3.02.2014	27,7	-	-
15	6.03.2014	24,9	24,8	26,8

Приведённые в табл. 2 случаи наиболее экстремальных скоростей ветра отбирались по всему 30-летнему массиву информации, при этом использовался так называемый принцип «независимых штормов» [6, 7], т.е. требовалось, чтобы между выбираемыми экстремумами было не менее 3-х суток, чтобы исключить попадание в итоговую выборку экстремумов, связанных с одной и той же синоптической ситуацией.

Синоптические особенности, приводившие к экстремальным скоростям ветра, обусловлены сильным термическим градиентом между континентальным воздухом восточной Евразии и морским умеренным воздухом над Тихим океаном и Охотским морем в зимних условиях. Это приводило к активной циклонической деятельности на полярном и арктическом фронтах над акваторией Охотского моря и, в

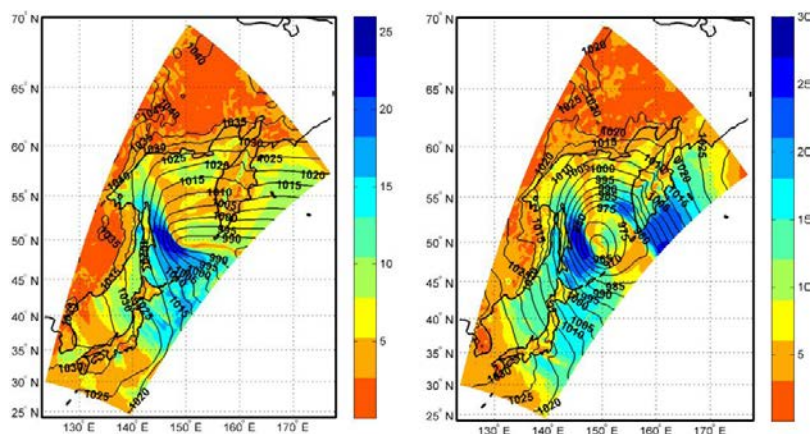


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 19.12.1989, 11 ч ВСВ.

частности, над Сахалином. Все без исключения экстремальные ветра были северных направлений и обусловлены прохождением циклонов.

В большинстве случаев (28.01.1989, 14.02.1996, 28.02.1999) наблюдалось формирование циклона над Приморским краем либо над Японским морем. Затем происходила его интенсификация, и смещение к о. Сахалин его центральной или южной части, в зависимости от траектории (рис.2). Далее вихрь пересекал о. Сахалин и выходил в Охотское море. Здесь обычно вновь происходило значительное усиление скоростей ветра на восточном побережье Сахалина (в тылу циклона). Длительность и интенсивность экстремальной ситуации зависят от продолжительности стационарирования циклона и скорости его дальнейшего перемещения, и варьируют от нескольких часов до суток и со скоростями ветра от 25 м/с до 35 м/с.

Другие экстремальные ситуации были связаны с проникновением уже развитого интенсивного циклона с Тихого океана либо через полуостров Камчатка, либо через острова Курильской гряды, или после прохождения через острова Японского архипелага, в первую очередь, о. Хоккайдо. Далее, циклоны, углубляясь, достаточно быстро (менее суток) пересекали акваторию Охотского моря и приближались к о. Сахалин (рис. 3). Для данной группы ситуаций были характерны менее глубокие, но при этом более обширные циклоны.

Специальное сравнение воспроизведения этих экстремальных синоптических ситуаций на различных горизонтальных разрешениях показало, что при горизонтальном разрешении 2,2 км полосчатость и пятнистость полей проявляется ярче, а максимум скорости ветра, как правило, немного увеличивался (до 2 – 3 м/с). В подавляющем большинстве случаев это приводило к заметному уменьшению ошибок воспроизведения средней скорости ветра и порывов. В то же время, изменения вышеупомянутых характеристик при переходе от 13,2 км к 6,6 км выражены менее ярко и однозначно. Это, вкуче с приведёнными выше результатами верификации, позволяет заключить, что моделирование при разрешении 6,6 км, по-видимому, не даёт существенного улучшения результатов, в то время как на субкилометровом масштабе явное разрешение глубокой конвекции и более детальное описание рельефа, конфигурации побережья и характеристик турбулентного движения позволяет заметно улучшить качество воспроизведения экстремальных скоростей ветра в приземном слое.

В результате проведённой работы отработана технология создания многолетних архивов гидрометеорологической информации высокого разрешения с применением мезомасштабной модели COSMO-CLM и метода даунскейлинга. Эта технология, с учётом адаптации модели и конкретных задач, может быть использована для различных регионов России и земного шара.

По результатам расчётов проведена верификация полученного массива на основе данных стационарных наблюдений, которая позволила сделать вывод о том, что использованный метод даунскейлинга с применением модели COSMO-CLM адекватно воспроизвел как метеорологический режим акватории Охотского моря, так и ситуации экстремальных скоростей ветра у побережья Сахалина. Выявлены зависимости качества воспроизведения мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции от горизонтального разрешения модели. В частности, показано, что использование разрешения ~6 км не даёт существенного улучшения по сравнению с разрешением ~13 км, в то время как разрешение ~2,2 км обеспечивает улучшение качества. Также по данным архива проведен синоптический анализ ситуаций, сопровождающихся экстремальными скоростями ветра, выявлены основные типы, благоприятствующие их возникновению.

Полученный массив данных высокого пространственно-временного разрешения является несомненным подспорьем для дальнейших исследований физических механизмов формирования экстремальных погодных явлений различного генезиса и масштаба, анализа качества воспроизведения гидрометеорологических полей, их статистических оценок, многолетних трендов в данном регионе, а также использования этой информации для задач подробной оценки состояния окружающей среды.

Литература:

1. COSMO Model documentation <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>
2. CLM Community site <http://www.clm-community.eu/>
3. Böhm U., Kuecken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications. COSMO Newsletters, No. 6, 2006, pp. 225 – 235.
4. Rockel B., Will A. and Hense A. The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). Meteorologische Zeitschrift, Vol. 17, No. 4, pp. 347 – 348, 2008
5. Schulz J.-P., Heise E. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts. // COSMO Newsletter. 2003. V.3. P. 221-225.
6. Cook N.J. Towards better estimation of wind speeds. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1982. №9. P. 295–323.
7. Cook, N.J. The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures. // Part 1: Background, Damage Survey, Wind Data and Structural Classification. Building Research Establishment. Garston and Butterworths. 1985. London. 371 p.

Forecast of polar stratospheric vortex dynamics using SL-AV global atmospheric model

Shashkin V.V., Tolstykh M.A.

G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

Hydrometeorological centre of Russia, Moscow, Russia

E-mail: vvshashkin@gmail.com

Polar stratospheric vortex is the characteristic feature of the winter-time stratospheric circulation. Under the influence of planetary waves raising from the troposphere, the polar vortex can be distorted and even broken up. During the vortex breaking the relatively warm mid-latitude stratospheric air is advected to the high latitudes that results in the growth of stratospheric temperature by 25-50 °K in a few days. This situation is called sudden stratospheric warming (SSW). The number of articles show the influence of SSW on the dynamics of troposphere (Borovko, Krupchatnikov, 2009; Vargin, Medvedeva, 2015; Baldwin et al., 2003; Perlwitz, Harnik, 2004; Kolstad et al. 2010 and many others). Therefore the particular question of interest is the predictability of SSWs by the atmospheric general circulation models. Most of works study the predictability in the statistical context on the seasonal and climatic time-scales (Vargin, Volodin, 2016; Charlton et al., 2007; Sun et al., 2012).

This work studies the quality of deterministic forecast of polar stratospheric vortex dynamics by the SL-AV global atmospheric model (Tolstykh, 2010). We use multiscale version of the SL-AV model (Tolstykh et al., 2015) with horizontal resolution of $0.9^\circ \times 0.72^\circ$ and 60 vertical levels. 17 vertical levels are located above the tropopause.

The series of 15 days forecasts starting at 12 UTC of 1-31 January of 2014, 2015, 2016 is carried out. The initial data is Hydrometeorological centre of Russia operative analysis. The period covered by forecasts includes 4 minor SSWs associated with vortex splitting (2 February 2014, 5 January 2015, 27 January 2015) and shifting (1 February 2016).

The particular characteristic illustrating the accuracy of polar vortex dynamics reproduction is correlation of 10 hPa surface geopotential height anomalies between the forecast and reanalysis (ERA-Interim) plotted in Fig. 1. Horizontal lines in Fig. 1 indicate 0.8 and 0.6 levels corresponding to "highly accurate" (above 0.8) and "useful" (between 0.6 and 0.8) forecasts according to (Bauer et al., 2015; Manual on the global data processing and forecasting system http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_485-v1_en.pdf). All test forecasts, but 3 are useful for at least 7 days, with 80% of forecasts are "highly accurate" at day 7. Anomaly correlation of 50% of test forecasts falls below 0.6 by day 12 from start. One can conclude that SL-AV model accurately reproduces the dynamics of polar stratospheric vortex for 7 days, that is somewhat longer than the accurate forecast range for the most of meteorological characteristics in troposphere. Consideration of other fields and forecast scores confirm this conclusion.

The reliability of SL-AV forecast of strong polar vortex perturbations is of special interest. SL-AV forecast examples during minor SSW are shown in Figs. 2, 3. Considering 4 minor SSWs cases included in the test