

УДК 551.55:620.9

## Возможности макромасштабной и мезомасштабной моделей для моделирования работы ветропарка на примере Адыгейской ВЭС

Иванов Александр Владимирович<sup>[0000-0002-2052-3912] 1,2,3</sup>Стрижак Сергей Владимирович<sup>[0000-0001-5525-5180] 1,4</sup><sup>1</sup> Институт системного программирования РАН, Москва, Россия<sup>2</sup> Институт прикладной математики РАН, Москва, Россия<sup>3</sup> E-mail: av.ivanov@ispras.ru,<sup>4</sup> E-mail: s.strijhak@ispras.ru

**Аннотация.** Работа посвящена применению мезомасштабной и макромасштабной моделей для исследования работы ветропарка. Используются данные GFS модели и вычислительный пакет WRF-ARW для расчета метеоусловий в районе расположения ветропарка Республики Адыгея и прогноза вырабатываемой мощности ветропарка. Представлен прогноз распределения скорости ветра, а также прогноз потерь вырабатываемой мощности ветропарка. Проведена оценка вихревого следа, образованного ветротурбинами.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветропарк, прогнозирование метеоусловий, численная модель, сетка, скорость, мощность, WRF, след

### 1 Введение

Возобновляемая энергетика в России является активно развивающейся отраслью. Отдельное внимание в том числе уделяется ветроэнергетике, как одному из перспективных направлений в развитии возобновляемых источников энергии. Так список регионов, использующих ветряные электростанции (ВЭС), пополнился Ульяновской областью, Республикой Саха, Ставропольским краем, Ростовской и Мурманской областями. В том числе в марте 2020 года проведен запуск ветропарка в Республике Адыгея, суммарная мощность которого 150 МВт. На данный момент Адыгейская ВЭС является крупнейшей в России.

Как и любая другая развивающаяся область, ветроэнергетика порождает ряд задач, решение которых необходимо для дальнейшего становления этой отрасли. В том числе речь идёт о построении численных моделей ветропарков, а возможно и полноценных цифровых двойников, с целью мониторинга и исследования ветропарков в России, оптимизации параметров их работы, изучения влияния вихревого следа ветротурбин на микроклимат окружающей местности, прогноза выработки мощности и метеоусловий в районе ВЭС, изучения аэрофизических процессов, протекающих в ветропарке и др.

Обширный обзор современных статей и исследований на тему построения моделей ветропарка приводится в работе [1].

В данной работе описывается уже распространённый подход применения иерархии моделей для исследования ветропарка. Его основная идея заключается в выборе характерного масштаба для отдельных физических процессов, а также в построении иерархической структуры взаимосвязи моделей. Так, например, на рис. 1 приведен пример исследования работы ветропарка на трёх различных масштабах: макромасштаб – уровень разрешения 100 км – как правило включает в себя глобальные модели для построения прогноза климатических условий, является источником данных начальных и граничных условия для расчёта по мезомасштабной модели, которая позволяет производить исследование и мониторинг климатических процессов, происходящих в ветропарке (разрешение – 1 км). Следующим этапом является моделирование на микромасштабе, которое подразумевает разрешение отдельных частей ветроэлектрической установки (ВЭУ) и процессов, связанных с ними.

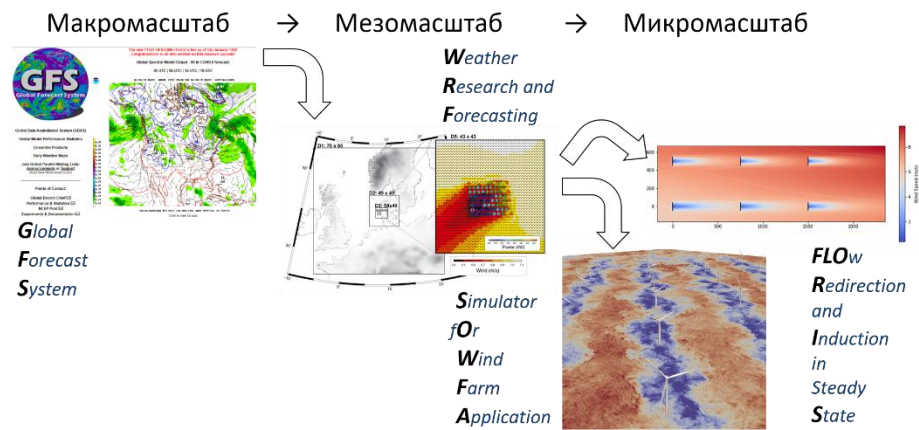


Рис. 1. Моделирование работы ветропарка на различных масштабах

## 2 Математическая модель

Выбор физико-математических моделей для различных масштабов зависит от конкретной задачи и совместимости этих самых моделей. Распространенным примером является иерархия моделей “макромасштаб-мезомасштаб-микромасштаб”: GFS – WRF – SOWFA/FLORIS, рис. 1, см. например, [1].

Global Forecast System (GFS) – это глобальная система численного прогноза погоды, содержащая глобальную компьютерную модель и модели вариационного анализа, разрабатываемая Национальной метеорологической службой США (NWS).

Модель GFS – это спектральная модель с приблизительным горизонтальным разрешением 13 км в течение первых 10 дней и 27 км с 10 до 16 дней. По вертикали модель разделена на 64 слоя и по времени выдает прогнозируемый результат каждый час в течение первых 120 часов. Математическая модель запускается четыре раза в день и выдает прогноз на срок до 16 дней, но с уменьшенным пространственным разрешением может выдавать результат до 10 дней. Точность прогноза, как правило, уменьшается со временем (как и в любой численной модели прогноза погоды), а для более долгосрочных прогнозов значительную точность сохраняют только более крупные масштабы. Это одна из преобладающих моделей средней дальности синоптического масштаба общего назначения.

Результаты данных GFS модели доступны с сайта (<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>). Файлы с данными GFS на текущий момент предоставляются в открытом доступе по FTP (<ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod>). Поля анализа GFS, а также прогностические поля этой модели могут быть использованы в качестве начальных данных для мезомасштабных моделей океана и атмосферы. ФГБУ «Гидрометцентр России» использует систему прогноза ветрового волнения в Черном море с учетом данных GFS для шельфовых зон (Керченский пролив, Цемесская бухта, район Сочи) в качестве вспомогательного метода.

Результаты расчётов по модели GFS являются источниками начальных и граничных условий для построения прогноза региональной модели WRF-ARW. Пакет WRF-ARW разрабатывается в Национальном центре атмосферных исследований (NCAR, США) с середины 1990-х годов. Схема работы WRF-ARW изображена на рис. 2. Вычислительный пакет представляет собой 3 модуля, взаимодействующих посредством обмена данными. Основой программы является вычислительное ядро WRF-ARW, которое базируется на уравнениях для сжимаемой жидкости с негидростатической моделью, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты по вертикали.

Инициализация модели происходит в модуле препроцессинга (WPS) и представляет собой извлечение данных из файлов расчёта по глобальной модели (`ungrib.exe`), подготовке сетки по заданным параметрам (`geogrid.exe`) и интерпо-

ляцию величин на новую сетку (metgrid.exe), рис. 2. При этом параметры области описываются в файле namelist.wps.

Результаты расчётов по модели WRF затем обрабатываются в модуле пост-процессинга и далее могут быть изменены, обработаны, либо визуализированы с применением различных программ, рис. 2.

Расчетная область модели WRF-ARW рассматривается в декартовой системе координат и представляет собой параллелепипед, стороны которого ориентированы вдоль меридианов и параллелей, а основание касается сферической Земли [2]. Для увеличения точности расчетов, вычисления проводятся на вложенных сетках, однако вложения выполняются только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов неизменна на всех сетках. Вложенные сетки ориентированы точно так же, как и основная (материнская) сетка и, наконец, шаг каждой дочерней сетки должен быть в целое число раз меньше, чем шаг родительской сетки. Имеется также возможность решения задачи на подвижной сетке.

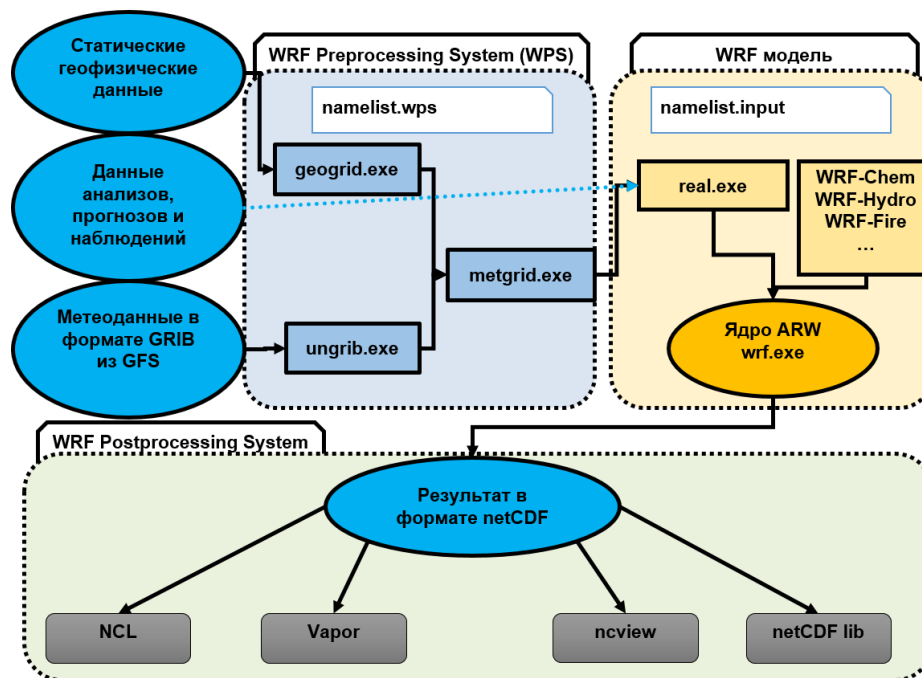


Рис. 2. Схема работы WRF-ARW

Одна из первых работ, посвященных тематике моделирования ВЭС с использованием WRF-ARW, была связана с исследованием потерь мощности ВЭУ ветропарка Horns Rev (Дания), располагающегося на морском побережье [3]. Исследование основано на наблюдениях и численном моделировании с применением кода WRF-ARW, [4]. В результате было показано, что мезомасштабные

модели, такие как WRF-ARW, способны качественно воспроизводить метеоусловия, связанные с влиянием морских ветряных электростанций. Также в работе [3] были исследованы причины потери выработки энергии на исследуемой ВЭС. Более подробное исследование, рассматривающее тот же ветропарк, описано в статье [1]. В работе приводится детальное обсуждение вопросов совмещения и связи мезо- и микромасштабных моделей для моделирования ветропарков, а также обзор имеющихся исследований в этом направлении. В работе [5] рассматривается новая модель VWiS для моделирования ветропарков, которая использует данные мезомасштабной модели WRF в качестве начальных и граничных условий. В работе [6] выполняется моделирование физических параметров в атмосферном пограничном слое с помощью вихререшающего моделирования в сравнении с данными, полученными с 200-метровой метеовышки Cabauw в Нидерландах, с применением программы WRF.

Начиная с исследования, опубликованного в [7] в WRF-ARW появляется возможность параметризации ветропарка, задавая кривую мощности ( $C_P$ ) и коэффициента тяги  $C_T$ , предоставляемую производителями ветротурбин. ВЭУ при этом представлялась как имеющий форму сплошного диска, располагающегося на высоте башни ветротурбины преобразователь кинетической энергии в электрическую и турбулентную, величину которой определяет к-т  $C_{TKE}$ :

$$C_{TKE} = C_T - C_P. \quad (1)$$

Сила сопротивления, создаваемая ветротурбиной на набегающий поток, может быть выражена уравнением:

$$F_{drag} = \frac{1}{2} C_T \rho |V|VA. \quad (2)$$

При этом уравнение изменения импульса для ячейки  $(i, j, k)$  имеет вид

$$\frac{\partial |V|_{ijk}}{\partial t} = - \frac{0.5 N_t^{ij} C_T (|V|_{ijk}) |V|_{ijk}^2 A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)}. \quad (3)$$

Уравнение для мощности, вырабатываемой турбинами, имеет вид

$$\frac{\partial P_{ijk}}{\partial t} = \frac{\frac{1}{2} N_t^{ij} C_P (|V|_{ijk}) |V|_{ijk}^3 A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)}. \quad (4)$$

Тогда, используя (1) можно найти оставшуюся энергию, которая переходит в турбулентную:

$$\frac{\partial TKE_{ijk}}{\partial t} = \frac{\frac{1}{2} N_t^{ij} C_{TKE} (|V|_{ijk}) |V|_{ijk}^3 A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)}. \quad (6)$$

Здесь  $C_{ТКЕ}$  – доля турбулентной кинетической энергии,  $F_{drag}$  – сила трения,  $A = \pi D^2/2$  – площадь ветроколеса, а  $V = (u, v)$  – горизонтальная скорость ветра.

### 3 Постановка задачи

Объектом исследования в данной работе является ветропарк, расположенный возле хутора Келеметов, на территории Шовгеновского и Гиагинского районов Республики Адыгея ( $45^\circ 56' 52''N 40^\circ 6' 30''E$ ), рис. 3.

Исследуемая ВЭС насчитывает 60 ветротурбин, мощность каждой ВЭУ равна 2.5 МВт, соответственно суммарная мощность ветропарка 150 МВт. Высота башни ВЭУ 99 м, диаметр ротора 100 м. Ветроустановки расположены в 6 рядов, расстояние между рядами порядка 300–350 м, а расстояние между рядами варьируется от 500 до 1800 м.

Вблизи Адыгейской ВЭС располагается несколько крупных населенных пунктов, таких, например, как Белореченск (расстояние до ВЭС порядка 24 км) или Курганинск (расстояние до ВЭС порядка 37 км), рис. 1. Кроме того, рядом находятся ещё несколько небольших населенных пунктов. Самый крупный из ближайших – станция Гиагинская.

Согласно усредненным данным с метеостанций по направлению ветра в Гиагинской, ветропарк находится под воздействием преимущественно северо-восточного ветра, с переменами в сторону восточного, северо-западного и северного направления. При этом ВЭС располагается в районе, в котором преобладает в основном ровная местность, без массивных лесных насаждений. Таким образом, потенциальный вихревой след, генерируемый ветропарком, может распространяться на большие расстояния, вплоть до 15 км, как, например, в случае ветропарка Horns Rev, [3]. Прогнозирование направления и размеров вихревого следа, а также изменение ветровой обстановки вблизи ветропарка, а в особенности вблизи населенных пунктов – важная задача, которая может быть решена посредством математического моделирования. Кроме того, знание направления и распределения скорости ветра, а также снижения ветровой нагрузки для каждого из рядов ВЭУ поможет, как спрогнозировать потенциальную вырабатываемую мощность ВЭС, так и оптимизировать параметры управления ветропарком, такие, например, как угол рыскания, скорость вращения ветроколеса, а также угол наклона лопасти.

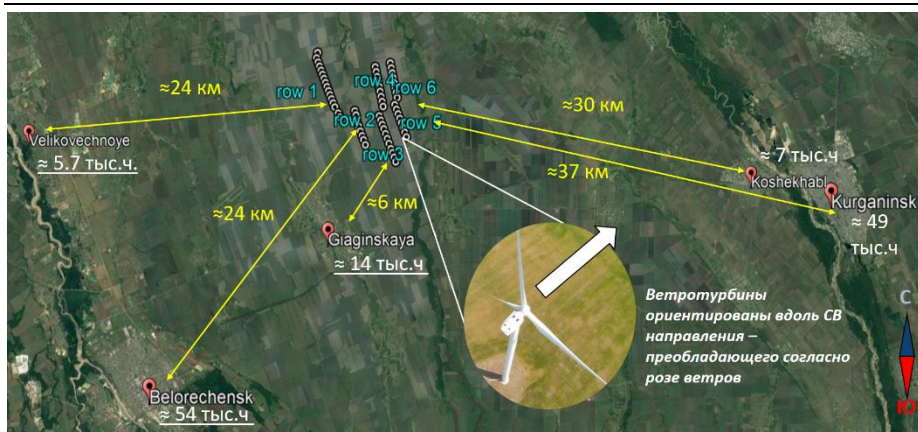


Рис. 3. Схема расположения ВЭУ в ветропарке Республики Адыгея

#### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследуемого ветропарка была создана тестовая конфигурация, состоящая из четырёх вложенных областей, параметры которых приведены в табл. 1. В области с наибольшим разрешением (d04) располагается 60 ветротурбин, размещённых согласно координатам, взятым из спутниковых снимков открытой программы Google Earth, рис. 3. Поскольку для ВЭУ, смонтированных в данном ветропарке, не удалось найти в открытом доступе зависимость кривой мощности и коэффициента тяги от скорости, для параметризации ветротурбин в WRF были использованы данные ветроустановок, схожих по параметрам.

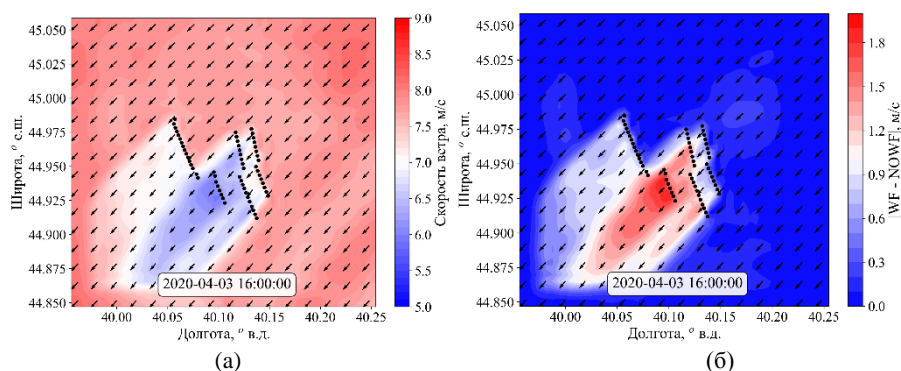
Таблица 1. Параметры сеток расчётной области.

Область	Размеры сетки	Шаг сетки	WFP
d01 (main)	64 × 55	13.5 км	-
d02	49 × 49	4.5 км	-
d03	49 × 49	1.5 км	-
d04	49 × 49	500 м	Есть
d05	49 × 49	500 м	-

Разбиение по вертикали составляло 41 уровень, с нижней точкой – 10 м над поверхностью земли. Для моделирования использовался адаптивный шаг по времени. Параметризация ветропарка (Wind Farm Parameterization – WFP) включалась только в самой маленькой области – d04.

Расчет был произведен на период 01.04.2020 00:00 – 01.05.2020 00:00 UTC. На рис. 4 представлено распределение ветра на высоте гондолы ВЭУ на дату 3 апреля 2020 года, 16:00 UTC. Можно заметить, что след от ветропарка направлен с ветром и простирается до границы расчетной области, что составляет

около 15 км. На рис. 4б видно, что для второго ряда ВЭУ дефицит скорости ветра достигает 2 м/с. Примерный дефицит скорости ветра второго ряда ВЭУ достигает 2 м/с. Также была рассчитана прогнозируемая мощность ВЭС с учетом параметризации ветропарка, а также потери выработки электроэнергии, исходя из разности суммарной мощности ВЭС (рассчитанной просто по кривой мощности) и прогнозируемой мощности ПЭС (рассчитанной просто по расчету). Показано, что падение мощности может достигать 1 МВт из-за падения скорости ветра во втором и четвертом ряду ВЭУ.



**Рис. 4.** Расчет для 3 апреля 2020 года, 16:00 UTC: (а) распределение скорости ветра на высоте 99 м для расчета WF; (б) модуль разности скорости ветра на высоте 99 м (высота башни) для расчёта без параметризации ветропарка и расчета с параметризацией ветропарка.

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В совокупности описанные модели позволяют строить прогноз для выбранной местности с ветропарком.

Данные модели GFS, региональной модели прогноза погоды WRF-ARW и библиотеки SOWFA могут быть использованы для разработки цифровой модели Адыгейского ветропарка.

С применением модели WRF-ARW был получен прогноз метеоусловий в районе расположения ветропарка Республики Адыгея с включенной и отключенной параметризацией ветропарка. Показано, что потенциальный вихревой след может достигать размеров вплоть до 15 км. В перспективе возможно углубленное исследование данного ветропарка, а именно интерполяция полученных значений на более подробную сетку для расчета в библиотеке SOWFA пакета OpenFOAM в качестве начальных и граничных условий, т.е. в дальнейшем потребуются создание сетки и моделей ветротурбин в библиотеке SOWFA и объединение мезомасштабных данных с этой моделью.

Целесообразно проводить расчет для полного календарного года, как это сделано в работе [8] с использованием данных модели GFS и расчетного пакета WRF-ARW для ветропарка в Галисии, Испания.



Разрабатываемый программный комплекс на базе свободного программного обеспечения может быть использован российскими энергетическими компаниями для проектирования и мониторинга ВЭС на территории РФ.

## Литература

1. Rodrigo J. S. et al. Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation // WIREs Energy Environ. 2016. Vol. 6. No. 2. P. e214.
2. Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. 80 лет Гидрометцентру России. 1939 - 2010. 2010. С. 94-135.
3. Jiménez P. A., Navarro J., Palomares A. M. and Dudhia J. Mesoscale modeling of offshore wind turbine wakes at the wind farm resolving scale: a composite-based analysis with the Weather Research and Forecasting model over Horns Rev // Wind Energ. 2014. Vol. 18. No. 3. P. 559–566.
4. Skamarock W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. UCAR/NCAR. 2019.
5. Yang X., Sotiropoulos F., Conzemius R. J., Wachtler J. N. and Strong M. B. Large-eddy simulation of turbulent flow past wind turbines/farms: the Virtual Wind Simulator (VWiS) // Wind Energ. 2014. Vol. 18. No. 12. P. 2025–2045.
6. Rodrigo J. S. et al. Results of the GABLS3 diurnal-cycle benchmark for wind energy applications // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 854. P. 012037.
7. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. UCAR/NCAR - Research Data Archive. 2000.
8. Miguel A. P. et al. Wind power forecasting for a real onshore wind farm on complex terrain using WRF high resolution simulations // Renewable Energy. 2019. Vol. 135. P. 674-686.

## References

1. Rodrigo J. S. et al. Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation // WIREs Energy Environ. 2016. Vol. 6. No. 2. P. e214.
2. Vel'tishchev N. F., Zhupanov V. D. Chislennyye prognozy pogody po negidrostaticheskim modelyam obshchego pol'zovaniya WRF-ARW i WRF-NMM (Numerical weather forecasts by non-hydrostatic open-source models WRF-ARW and WRF-NMM) // In: 80 let Gidromettsentru Rossii (80 years to the Hydrometeorological Center of Russia). 2010. P. 94-135.
3. Jiménez P. A., Navarro J., Palomares A. M. and Dudhia J. Mesoscale modeling of offshore wind turbine wakes at the wind farm resolving scale: a composite-based analysis with the Weather Research and Forecasting model over Horns Rev // Wind Energ. 2014. Vol. 18. No. 3. P. 559–566.
4. Skamarock W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. UCAR/NCAR. 2019.

5. Yang X., Sotiropoulos F., Conzemius R. J., Wachtler J. N. and Strong M. B. Large-eddy simulation of turbulent flow past wind turbines/farms: the Virtual Wind Simulator (VWiS) // *Wind Energ.* 2014. Vol. 18. No. 12. P. 2025–2045.
6. Rodrigo J. S. et al. Results of the GABLS3 diurnal-cycle benchmark for wind energy applications // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 854. P. 012037.
7. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. UCAR/NCAR - Research Data Archive. 2000.
8. Miguel A. P. et al. Wind power forecasting for a real onshore wind farm on complex terrain using WRF high resolution simulations // *Renewable Energy.* 2019. Vol. 135. P. 674-686.

## **Possibilities of Macroscale and Mesoscale Models for Modeling the Operation of a Wind Farm on the Example of the Adygeya wind farm**

Ivanov Alexander<sup>1,2,3</sup>, Strijhak Sergey<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Ivannikov Institute for System Programming RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>3</sup>E-mail: av.ivanov@ispras.ru,

<sup>4</sup>E-mail: s.strijhak@ispras.ru

**Abstract.** The paper presents an example of using the mesoscale and macroscale modeling for the wind farm investigation. GFS data and WRF-ARW code were used for the calculation of the meteorological conditions and generated power in the area of the Republic of Adygea wind farm. The wind speed distribution forecast, as well as the forecast of losses of the wind farm generated power, are presented. An assessment of the wake formed by wind turbines is carried out.

**Keywords:** wind energy, wind farm, simulation, grid, velocity, power, WRF