DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-9

Моделирование метеоусловий в районе порта и в прибрежной зоне залива Тикси

¹ А.В. Иванов, ORCID: 0000-0002-2052-3912 <av.ivanov@ispras.ru>² С.В. Стрижак, ORCID: 0000-0001-5525-5180 <s.strijhak@ispras.ru>³ М. И. Захаров, ORCID: 0000-0002-8916-2166 <mplusz@inbox.ru>¹ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., 4² Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, 109004, Россия, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25³ ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58

Аннотация. Ветроэнергетика – одно из важнейших направлений в развитии возобновляемых источников энергии в РФ. Наиболее важными направлениями в ветроэнергетике являются задачи проектирования новых ветропарков, задачи эксплуатации и мониторинга ветропарков, задачи проектирования ветроэлектрических установок (ВЭУ), разработка тематического российского программного обеспечения и т.п. В связи со строительством новых ветропарков на территории РФ возникает ряд актуальных фундаментальных и прикладных задач. В данной работе рассматривается одна из таких задач: исследование ветровой обстановки в районе поселка Тикси, ввиду установки там ветроэлектростанции. Прогнозирование ветровой обстановки производится на основе мезомасштабной модели Advanced Research WRF (Weather Research and Forecasting) с использованием данных Global Forecast System (GFS) модели. Представленные расчеты производились на серии вложенных сеток с пространственным разрешением 1, 3 и 9 км. Предлагается методика для исследования и мониторинга ветропарка вблизи поселка Тикси, которая основана на интерполяции результатов, полученных из Advanced Research WRF, на модель меньшего масштаба в рамках библиотеки Simulator fOr Wind Farm Applications (SOWFA) открытого пакета OpenFOAM.

Ключевые слова: ветроэнергетика; прогнозирование; моделирование ветровой обстановки; мониторинг ветропарков; ветропарк в Тикси; WRF-ARW; GFS; SOWFA

Для цитирования: Иванов А.В., Стрижак С.В., Захаров М. И. Моделирование метеоусловий в районе порта и в прибрежной зоне залива Тикси. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 6, 2019 г., стр. 163–176. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-9

Modeling weather conditions in the port area and coastal zone of Tiksi Bay

¹ A.V. Ivanov, ORCID: 0000-0002-2052-3912 <av.ivanov@ispras.ru>² S.V. Strijhak, ORCID: 0000-0001-5525-5180 <s.strijhak@ispras.ru>³ M. I. Zakharov, ORCID: 0000-0002-8916-2166 <mplusz@inbox.ru>¹ M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematic of the Russian Academy of Sciences, 4, Miusskaya sq., Moscow, 125047, Russia² Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia³ M.K. Ammosov North-Eastern federal university, 58 Belinsky st., Yakutsk, 677000, Russia

Abstract. Wind energy is one of the most important directions in the development of renewable energy sources in the Russian Federation. The most important trends in the wind industry are objectives for the design of new wind farms, the tasks of maintenance and monitoring of wind farm design challenges of wind turbines, the development of Russian software, etc. A number of topical basic and applied problems are appeared in connection with the construction of new wind farms on the territory of the Russian Federation. In this paper, one of these tasks is considered: the study of the wind situation in the area of Tiksi village, due to the installation of a new wind farm there. The wind forecast is based on the Advanced Research WRF (Weather Research and Forecasting) mesoscale model using the Global Forecast System data. The presented results are obtained on a series of nested grids with spatial resolution of 1, 3 and 9 km. A method for wind farm study and monitoring of a near the village of Tiksi is proposed, which is based on interpolation the results obtained from WRF-ARW to a smaller scale model within the future use of Simulator fOr Wind Farm Applications (SOWFA) library in OpenFOAM platform.

Keywords: wind energy; forecasting; modeling of weather conditions; monitoring of wind farms; Tiksi wind farm; WRF-ARW; GFS; SOWFA

For citation: Ivanov A.V., Strijhak S.V., Zakharov M. I. Modeling weather conditions in the port area and coastal zone of Tiksi Bay. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 31, issue 6, 2019. pp. 163-176 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-9

1. Введение

Задачи моделирования погоды, изучения физических процессов в атмосфере Земли и в планетарном пограничном слое являются по-прежнему актуальными [1-3]. Ежедневно в Гидрометцентр России поступает большое количество числовых данных, которые совместно с множеством спутниковых снимков характеризуют состояние атмосферы Земли. Дважды в сутки проводится обработка информации, а затем на современном суперкомпьютере считается оперативный прогноз погоды. Приблизительно решается система дифференциальных уравнений в частных производных и уравнений, описывающих свойства вещества. Данная система описывает эволюцию метеорологических полей давления, скорости ветра, температуры, концентрации веществ. Данные расчета погоды по каждому региону России доступны в интернете.

Начиная с 2017 года в РФ (в Ульяновской области, Республика Адыгея, Республика Саха, в Ставропольском крае, в Ростовской и Мурманской областях) ведется строительство новых современных ветропарков. В ноябре 2018 года в арктическом поселке городского типа Тикси, который является важным транспортным узлом для Северного Морского пути, были введены в эксплуатацию 3 японских ветроэлектрические установки (ВЭУ) мощностью 0.3 МВт каждая. Успешная эксплуатация 3-х ВЭУ совместно с дизельгенератором в зимний период 2019 года показала эффективность выработки электроэнергии в сложных метеоусловиях и целесообразность дальнейшего развития

этого направления. В 2020 году в Булунском районе ветропарк альтернативных источников энергии пополнится тремя новыми японскими ветрогенераторами.

Ветроустановки дают большую экономию «Сахаэнерго». Учредители ветропарка — компании «Якутскэнерго» и «Русгидро» — стали пионерами в привлечении инвестиций в отдаленный арктический район — поселок Тикси, в котором ветровые нагрузки позволяют работать электростанции.

Пространственно организация поселка городского типа Тикси дисперсная и разделена на три микрорайона Тикси-1, Тикси-2 и Тикси-3. Всего в поселке проживает около 4600 человек. Тикси является одним из стратегически важных транспортных узлов Российского Севера, там имеется морской порт основная узловая часть инфраструктуры Северного морского пути и аэропорт федерального значения. Транспортно-экономическая значимость территории делает необходимым разработку новых подходов к рациональному природопользованию и к вопросу энергоснабжения в условиях Арктики. Несмотря на высокую устойчивость оборудования к климатическим изменениям, для обеспечения безопасного функционирования ветроустановок и для увеличения эффективности их работы важным фактором является наличие системы мониторинга и прогноза метеорологических условий в районе ветропарка Тикси. Помимо того не изучены вопросы надежной работы ВЭУ и оценки влияния ветропарка, работающего в сложных климатических условиях, на местный микроклимат. В настоящее время по данному ветропарку отсутствуют какие-либо научные публикации.

Ранее проводились исследования по моделированию метеоусловий в ветропарках с использованием модели WRF и данных с метеостанций. Одна из первых работ в этом направлении была связана с исследованием потерь мощности на ВЭУ ветропарка Horns Rev (Дания), расположенного на морском побережье [4]. Исследование основано на наблюдениях и результатах моделирования, выполненного с использованием WRF-ARW. Конфигурация модели имела высокое горизонтальное разрешение — 333 м. В результате было показано, что мезомасштабные модели, такие как WRF-ARW, способны качественно моделировать метеоусловия, связанные с морскими ветряными электростанциями. Более подробное исследование, рассматривающее тот же ветропарк, было приведено в работе [5]. Там приводится детальное обсуждение вопросов совмещения и связи мезо- и микромасштабных моделей для моделирования ветропарков, а также обзор имеющихся исследований в этом направлении. В работе [6] рассматривается новая модель VWiS для моделирования ветропарков, которая использует данные мезомасштабной модели WRF в качестве начальных и граничных условий. В работе [7] выполняется моделирование физических параметров в атмосферном пограничном слое с помощью вихреразрешающего моделирования в сравнении с данными, полученными с 200-метровой метеовышки Cabauw в Нидерландах, с применением программы WRF.

2. Постановка задачи

Ветропарк включает в себя 3 ВЭУ, их координаты: 71°39'25.8"N 128°46'18.7"E, 71°39'19.2"N 128°45'52.6"E, 71°39'11.9"N 128°45'46.8"E. Ветроустановки ветропарка Тикси расположены на высоте порядка 120 м над уровнем моря в 4 км от поселка Тикси и 2.7 км от моря Лаптевых, рис. 1. Тип климата в данном регионе — арктический, средняя температура самого холодного месяца -39.2, абсолютный минимум -50.5 С. Перепад между среднемесячной температурой самого холодного и самого тёплого месяца составляет 42.8 градусов, [8].

Распределение направлений и скорости ветра обуславливается барическим режимом над побережьем моря Лаптевых и Арктикой в целом, рис. 2. Направление и скорость ветра у поверхности земли также зависят от физико-географических особенностей, таких как

рельеф местности и высота над уровнем моря, Прилегающая территория Тикси разделена на две основные части: Хараулахский хребет на западной прибрежной части и аккумулятивная равнина Быковского полуострова на востоке [9].

Рис. 1. Карта поселка Тикси. Open Street Map
Fig. 1. Map of Tiksi village. Open Street Map

Рис. 2. Исследуемая область поселка Тикси, снимок со спутника, Sentinel 2A, Август 2019
Fig. 2. Study zone of Tiksi, Sentinel 2A RGB image August 2019

3. Математическая модель

Предлагаемая модель, как и во многих других подобных работах, например [6] и [7], включает в себя работу с 3 различными программными продуктами. Это связано с тем, что необходимо учитывать разные характерные масштабы при моделировании. Это «макромасштаб», в котором работает глобальная модель, являющаяся первичным источником метеоданных. В качестве такой модели, как правило, выбирается GFS. Далее следует «мезомасштаб», в рамках которого производится интерполяция глобальных данных и расчет региональных областей. В роли мезомасштабной модели выступает WRF-ARW. Результатом всего моделирования является «микромасштаб», рассматривающий и исследующий область вблизи ветроустановок. В качестве такой модели предлагается использовать библиотеку SOWFA в составе открытого пакета OpenFOAM 2.4.0. Расскажем подробнее о каждой из моделей.

3.1 Модель GFS

Global Forecast System (GFS) – это глобальная система численного прогноза погоды, содержащая глобальную компьютерную модель и модели вариационного анализа, разрабатываемая в Национальном центре прогнозов окружающей среды (NCEP, США). Модель GFS представляет собой сопряженную модель, состоящую из четырех отдельных моделей (модель атмосферы, океана, суши/почвы и модель морского льда), которые работают вместе, чтобы построить точную картину погодных условий. GFS – это спектральная полулагранжева модель с полу неявной схемой интегрирования по времени, имеющая горизонтальное разрешение 13 км в течение первых 10 дней прогнозирования и 28 км с 240 до 384 часов (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 через 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, также в неё регулярно вносятся изменения для повышения ее производительности и точности прогноза.

Результаты данных GFS модели доступны с сайта¹. Файлы с данными GFS на данный момент предоставляются в открытом доступе по FTP². Поля анализа GFS, а также прогностические поля этой модели могут быть использованы в качестве начальных данных для мезомасштабных моделей океана и атмосферы.

Метеоданные для текущих расчётов были взяты из Глобальной системы усвоения данных (GDAS, [10]) на основе модели GFS, подготавливаемые каждые шесть часов на сетке с разрешением в 1 географический градус.

3.2 Модель WRF-ARW

Пакет WRF-ARW разрабатывается в National Center for Atmospheric Research (NCAR, США) с середины 1990-х годов. Модель WRF-ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием ортографической координаты η по вертикали, которая напоминает сигма-координату, но отличается от нее тем, что она определяется не через

полное давление p , а через его гидростатическую составляющую p_h . Пакет WRF-ARW может быть использован в целях краткосрочного прогноза опасных явлений погоды (сильных осадков и ветров, града), связанных с интенсивными мезомасштабными системами циркуляции: мезомасштабными конвективными комплексами, линиями шквалов и атмосферными фронтами.

Расчетная область модели WRF-ARW рассматривается в декартовой системе координат, сетка представляет собой параллелепипед, стороны которого ориентированы вдоль меридианов и параллелей, а основание касается сферической Земли. Для увеличения точности расчётов, 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.

Для корректного моделирования микро- и макропроцессов численное решение уравнений в WRF-ARW происходит с расщеплением по времени: медленные или низкочастотные моды, связанные с процессом переноса, интегрируются с использованием схемы Рунге-Кутты третьего порядка по времени (РК3), а высокочастотные акустические моды, связанные с процессом адаптации полей давления и скорости, интегрируются с меньшим шагом по времени для сохранения вычислительной устойчивости.

Программа WRF-ARW используется в качестве системы прогноза метеоусловий. В частности в Гидрометцентре России эксперименты по составлению прогнозов с помощью модели WRF-ARW начались в 2007 г. Опубликовано много работ по этой тематике, например [11] и [12]. Значительное количество работ имеется об использовании WRF-ARW за рубежом, например, [13].

Детальное описание физической модели используемой системы уравнений, а также их численного решения и параметризации физических процессов приводится в основном документе для последней, на данный момент, версии ARW v.4, [14]. Краткий обзор модели также приведен в работах Гидрометцентра России, например, в [6]

WRF-ARW – сложная вычислительная система, состоящая из трёх основных модулей: препроцессинговой системы (WPS), модели ARW и постпроцессинга (WPP). На рис. 3 изображена схема работы WRF.

Модуль WPS производит инициализацию статических геофизических данных (рельефа, типа почв, типа подстилающей поверхности и т.д.) в соответствии с параметрами, заданными в файле namelist.wps, также под эти параметры извлекаются метеоданные из базы GFS, а затем производится горизонтальная интерполяция всех полей в узлы вычислительной сетки модели ARW. Помимо статических геофизических, а также метеорологических данных, в ARW есть возможность использовать данные анализов, наблюдений и прогнозов, для этого существует система усвоения данных (WRFDA).

В модуле WRF модели производится инициализация необходимых входных параметров и параметризация физических процессов по описанным в namelist.input переменным. После этого происходит запуск ядра ARW, т.е. численное решение уравнений, описывающих заданную физическую модель.

Обработкой полученного результата занимается модуль постпроцессинга. Данный модуль является опциональным и имеет в себе множество вариантов для обработки, визуализации и интерпретации полученных расчетов.

¹ <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>

² <ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod>

Рис. 3.Схема работы WRF-ARW
Fig. 3. WRF-ARW operation scheme

3.3 Библиотека SOWFA

Библиотека SOWFA, разработанная в Национальной лаборатория по изучению возобновляемой энергии (NREL) на базе математической модели для несжимаемых течений в открытом пакете OpenFOAM 2.4.0, является реализацией алгоритмов и численных инструментов для комплексного моделирования ветропарков. В составе библиотеки SOWFA имеется несколько решателей, в том числе для расчёта атмосферного пограничного слоя, решатель ABLSolver, и физических параметров в ветропарке, решатель windPlantSolver, с использованием метода крупных вихрей (LES). В библиотеке имеется несколько моделей для подсеточной турбулентной вязкости, специальные граничные условия для задания скорости и температуры. Модель Actuator Line Model, или модель плоских сечений аэродинамических профилей, как и модель Actuator Disk Model, могут быть использованы для расчёта течения вблизи вращающихся лопастных турбин на фиксированной расчётной сетке, что значительно экономит вычислительные ресурсы и упрощает процесс счёта. Обзор открытой библиотеки SOWFA приведен в работе [15].

3.4 Расчет метеоусловий

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. Данные модели GFS, возможности региональной модели прогноза погоды WRF-ARW и библиотеки SOWFA могут быть использованы для разработки цифровой модели ветропарка города Тикси. Для демонстрации возможностей пакета WRF-ARW далее приводится пример модельного расчёта.

4. Использование WRF-ARW

4.1 Моделируемая область

Для модельного расчета была выбрана ограниченная область в пределах поселка Тикси. В качестве способа отображения горизонтальной плоскости использовалась проекция Меркатора. Для более точного прогнозирования внутри основной рассматриваемой области (d01) были выбраны подобласти d02 и d03, охватывающие посёлок Тикси и прилегающую акваторию, схема расположения областей изображена на рис. 4. Количество уровней по вертикали равно 33. Параметры областей приведены в табл. 1.

Рис. 4. Схема расположения основной области с изображением вложенных подобластей d02 и d03, выполненная с помощью NCL, [24]

Fig. 4. The layout of the main area with the nested subdomains d02 and d03, performed using NCL, [24]

Табл. 1. Параметры областей
Table 1. Zones parameters

Область	Координаты центра	Размер расчетной сетки по горизонтали	Шаг по горизонтали
Основная (d01)	71°36'N 128°54'E	40×40	9 км
Вложенная (d02)	71°50'47"N 129°41'9"E	52×52	3 км
Вложенная (d03)	71°36'50"N 128°46'8"E	13×13	1 км

Расчет проводился для 42 часов в период 29.09.2019 00:00 – 30.09.2019 18:00. В качестве параметризации физических процессов в модели была выбрана стандартная схема (CONUS), подходящая для небольших областей и имеющая следующие параметры:

- для параметризации микрофизики – схема Томпсона, [16];
- для параметризации конвекции – модифицированная схема Tiedtke, [17];
- для коротковолновой и длинноволновой радиации – модель RRTMG, [18];
- для параметризации планетарного пограничного слоя – параметризация Меллора-

Ямады-Янича, [19 - 21];

- для параметризации приземного слоя – схема Мони́на-Обухова-Янича, [22];
- для параметризации процессов на поверхности и почве – унифицированная модель Noah, [23].

В модели принят следующий перечень вертикальных η -уровней: 1.000, 0.997, 0.989, 0.981, 0.969, 0.956, 0.918, 0.893, 0.863, 0.829, 0.791, 0.749, 0.705, 0.658, 0.610, 0.561, 0.512, 0.463, 0.412, 0.363, 0.314, 0.268, 0.223, 0.182, 0.144, 0.113, 0.086, 0.064, 0.045, 0.029, 0.016, 0.005, 0.000. Шаг по времени для родительской сетки – 1 минута.

4.2 Результаты расчета

Модель WRF-ARW позволяет получить большой спектр физических величин, описывающих погодные условия. В качестве основных параметров, как правило, выделяют распределение скорости ветра, температуры и давления. В качестве второстепенных параметров могут выступать влажность воздуха, распределение осадков, тип осадков и многое другое.

Для сравнения результатов была выбрана метеостанция Тикси: 71°34'48"N 128°54'E, высота над уровнем моря 7 м, метеоданные брались с сайта <http://www.pogodaiklimat.ru>, они продублированы в табл. 2. В ближайшей к месту расположения метеостанции точке области d03 выводились данные о температуре на уровне 2 м над поверхностью, давлении и скорости ветра на поверхности (на уровне метеостанции). Графики сравнения данных приведены на рис. 5-7.

Табл. 2. Данные метеостанции Тикси

Table 2. Tiksi weather station data

Время (UTC)	Дата	Ветер		T, °C	P ₀ , гПа
		Направление	Скорость, м/с		
0	29.09	ЮЗ	3	0.6	1010.2
3	29.09	З	4	1.6	1009.7
6	29.09	З	3	1.3	1009.9
9	29.09	З	3	0.1	1010
12	29.09	ЮЗ	2	-0.6	1009.9
15	29.09	З	2	-1	1009.4
18	29.09	З	3	-1	1008.8
21	29.09	ЮЗ	1	-1.8	1007.9
0	30.09	З	2	-0.7	1007.7
3	30.09	СЗ	4	0.2	1007.3
6	30.09	С	4	0.2	1007.1
9	30.09	СЗ	3	-0.8	1007.2
12	30.09	СЗ	5	-1.8	1007
15	30.09	СЗ	5	-3	1006.4
18	30.09	СЗ	8	-1.6	1006
21	30.09	СЗ	7	-2.6	1005.7

Наблюдается занижение температуры на поверхности, рис. 5. Это свойственно для модели, основной причиной тому могло стать наличие снега, а также некорректное задание статических данных местности. В целом эта проблема свойственна для WRF-ARW, её неоднократно упоминали в публикациях по моделированию метеоусловий. Одними из таких работ являются [25] и [26], в них также наблюдалось занижение температуры вплоть до 7-9 градусов Цельсия.

Рис. 5. Сравнение температуры в точке расположения метеостанции Тикси для модельных и реальных данных

Fig. 5. Comparison of temperature at the location of Tiksi weather station for model and real data

Рис. 6. Сравнение скорости ветра в точке расположения метеостанции Тикси для модельных и реальных данных

Fig. 6. Comparison of wind speed at Tiksi weather station location for model and real data

Рис. 7. Сравнение атмосферного давления в точке расположения метеостанции Тикси для модельных и реальных данных

Fig. 7. Comparison of atmospheric pressure at the location of Tiksi weather station for model and real data

Помимо этого, как уже отмечалось в [6], WRF-ARW плохо воспроизводит сильные ветра, что хорошо заметно на рис. 6. Однако, направление ветра практически полностью повторяет реальные данные.

Давление также имеет незначительные отклонения от наблюдаемого, рис. 7. В целом эти отклонения не превышают 100-150 Па.

На рис. 8 и 9 приведены карты распределения ветра над рельефом местности. Опираясь на данные из табл. 2, можно заметить, что направление ветра на изображениях в точке расположения метеостанции совпадает реальным направлением ветра (направление ветра учитывается с точки зрения того, откуда дует ветер), т.е это ЮЗ для рис. 8 и СЗ для рис. 10.

В целом, результаты модели соответствуют реальным данным, во всяком случае они повторяют профиль изменения показателей.

Рис. 8. Карта распределения скорости ветра над рельефом местности для 29.09 12:00
Fig. 8. A map of the wind speed distribution over terrain for 29.09 12 p.m.

Рис. 9. Карта распределения скорости ветра над рельефом местности для 30.09 3:00
Fig. 9. A map of the wind speed distribution over terrain for 30.09 3 a.m.

5. Заключение

С применением модели ARW был получен прогноз метеоусловий в районе поселка Тикси, а именно: картина распределения скорости ветра, давления и температуры на поверхности. Данные показатели являются основными для построения модели ветропарка. Следующий этап – это интерполяция полученных значений на сетку библиотеки SOWFA пакета OpenFOAM в качестве начальных и граничных условий.

Полученные результаты не отличаются высокой точностью, однако передают приближенную картину метеоусловий в исследуемой области.

Среднеквадратичная ошибка в расчете температуры составила порядка 3-4 градуса.

Причиной расхождения данных, полученных из наблюдений на метеостанции, и результатов моделирования может быть несколько. Во-первых, остается под вопросом точность статических геофизических данных для северных регионов России. Именно поэтому в перспективе предполагается улучшить их качество, поскольку текущие данные являются стандартными (предоставляются путем спектрорадиометрии) и поставляются вместе с пакетом WRF-ARW.

Во-вторых, планируется более точная калибровка модели WRF-ARW, т.е. задание корректной физической параметризации для включения тех или иных методов ядра ARW. Данные значения должны подбираться в соответствии с метеоусловиями и геофизической обстановкой исследуемого района поселка Тикси.

В-третьих, необходимо добавление в модель самих ветроустановок для изучения их влияния на погоду и климат. Это может быть произведено с помощью встроенной модели, работа которой проанализирована в [27].

Помимо этого, потребуются создание сетки и моделей ветротурбин в библиотеке SOWFA и объединение мезомасштабных данных с этой моделью.

Список литературы / References

- [1] Гордин В.А. Математика, компьютер, прогноз погоды и другие сценарии математической физики. М., Физматлит, 2010 г., 736 стр. / Gordin V.A. Mathematics, computer, weather forecast and other scenarios of mathematical physics. M., Fizmatlit, 2010, 736 p. (in Russian).
- [2] Лыкосов В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы: учебное пособие. М., Изд.-во Московского университета, 2012 г., 408 стр. / Lykosov V.N., Glazunov A.V., Kulyamin D.V., Mortikov E.V., Stepanenko V.M. Supercomputer modeling in the physics of the climate system: a training manual. Moscow, Publishing House of Moscow University, 2012, 408 p. (in Russian).
- [3] Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М., Физматлит, 2014 г., 252 стр. / Zilitinkevich S.S. Atmospheric turbulence and planetary boundary layers. M., Fizmatlit, 2014, 252 p. (in Russian).
- [4] Jiménez P.A., Navarro J., Palomares A.M., 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 Energy, vol. 18, issue 3, 2014, pp. 559–566.
- [5] Javier Sanz Rodrigo, Roberto Aurelio Chávez Arroyo et al. Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation. WIREs Energy Environ, vol. 6, issue 2, 2016, article no. e214
- [6] Yang Xiaolei, Sotiropoulos Fotis, Conzemius Robert, Wachtler John, Strong Mike. Large-eddy simulation of turbulent flow past wind turbines/farms: The Virtual Wind Simulator (VWiS). Wind Energy, vol. 18, issue 12, 2014, pp. 2025-2045.
- [7] Rodrigo J., Allaerts Dries et al. JMLM & Tomaszewski, Jessica & Troldborg, N & van der Laan, M. Paul & Veiga Rodrigues, Carlos. Results of the GABLS3 diurnal-cycle benchmark for wind energy applications. Journal of Physics: Conference Series, vol. 854, issue 1, 2017, article no. 012037.
- [8] Федоров А.Н., Торговкин Я.И. и др. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2018 г. / Fedorov A.N., Torgovkin Y.I. et al. The permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1: 1,500,000. Yakutsk, IIM SB RAS, 2018 (in Russian).
- [9] Periglacial features around Tiksi. Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA The Expedition LENA 2002. Berichte zur Polar- und Meeresforschung, vol. 466, 2003, 195 p.
- [10] NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.

Информация об авторах / Information about authors

Александр Владимирович ИВАНОВ – аспирант ИПМ имени М. В. Келдыша с 2019 года. Сфера научных интересов: численное моделирование и решение прикладных задач в области газо- и гидродинамики.

Aleksandr Vladimirovich IVANOV – PhD student of the Keldysh Institute of Applied Mathematics since 2019. Research interests: numerical modeling and solving applied problems in the field of gas- and hydrodynamics.

Сергей Владимирович СТРИЖАК – кандидат технических наук, ведущий инженер ИСП РАН с 2009 года. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, ветроэнергетика, теория турбулентности.

Sergei Vladimirovich STRIJHAK – candidate of technical sciences, leading engineer of the ISP RAS since 2009. Research interests: computational fluid dynamics, wind energy, theory of turbulence.

Моисей Иванович ЗАХАРОВ – ассистент, аспирант СВФУ. Сфера научных интересов: геоинформационное моделирование ландшафтов, разработка мобильных ГИС-приложений.

Moisey Ivanovich ZAKHAROV – assistant, PhD student of the NEFU in Yakutsk. Research interests: geoinformation modeling of landscapes, development of mobile GIS applications.

- [11]. Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. В сб. 80 лет Гидрометцентра России. 1939 - 2010, 2010 г., стр. 94-135. / Veltishchev N.F., Zhupanov V.D., Numerical weather forecasts by non-hydrostatic open-source models WRF-ARW and WRF-NMM, In 80 years to the Hydrometeorological Center of Russia, 2010, pp. 94-135.
- [12]. Лаппо П.О., Шакур В.Н., Прохарева М. Результаты верификации модели WRF-ARW в Гидромете Республики Беларусь. Труды Гидрометцентра России, вып. 358, 2015 г., стр. 67–77. / Lappo P.O., Shakur V.N., Prakharenia M. The results of verification of the WRF-ARW model in the Hydromet of the Republic of Belarus. Proceedings of Hydrometcentre of Russia, issue 258, 2015, pp. 67–77.
- [13]. Yijia Zheng, Yucong Miao, Shuhua Liu, Bicheng Chen, Hui Zheng, and Shu Wang. Simulating Flow and Dispersion by Using WRF-CFD Coupled Model in a Built-Up Area of Shenyang, China. Advances in Meteorology, vol. 2015, 2015, 15 p.
- [14]. Skamarock W.C., Klemp J.B. et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. Ncar Technical Notes, No. NCAR/TN-556+STR, 2019.
- [15]. Крапошин М.В., Стрижак С.В. Проблемно-ориентированная библиотека SOWFA для решения прикладных задач ветроэнергетики. Труды ИСП РАН, том 30, вып. 6, 2018 г., стр. 259–274 / Kraposhin M.V., Strijhak S.V. The problem-oriented library SOWFA for solving the applied tasks of wind energy. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 30, issue 6, 2018, pp. 259–274 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-14.
- [16]. Thompson G., Rasmussen R. M. and Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Monthly Weather Review, vol. 132, no. 2, 2004, pp. 519-642.
- [17]. Tiedtke, M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in largescale models. Monthly Weather Review, vol. 117, no. 8, 1989, pp. 1779-1800.
- [18]. Michael J. Iacono, Jennifer S. Delamere et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. Journal of Geophysical Research, vol. 113, issue D13103. 2008.
- [19]. Janjic Z.I. The step-mountain Eta coordinate model: Future developments of convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Monthly Weather Review, vol. 122, no. 5, 1990, pp. 927-945.
- [20]. Janjic Z.I. The surface layer in the NCEP Eta model. In Proc. of the 11th Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, 1996, pp. 354-355.
- [21]. Janjic Z.I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme. In the NCEP Meso model, NCEP Office Note, no. 437, 2002, 61 p.
- [22]. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. Труды Геофизического института АН СССР, том 151, вып. 24, 1954, стр. 163–187. // Monin, A.S. and A.M. Obukhov. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. Contributions of the Geophysical Institute of the USSR's Academy of Sciences, vol. 24, no. 151, pp. 163–187, 1954.
- [23]. Chen F. and J. Dudhia, Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. Monthly Weather Review, vol. 129, no. 4, 2001, pp. 569–585.
- [24]. The NCAR Command Language (Version 6.4.0) [Software]. Boulder, Colorado, UCAR/NCAR/CISL/VETS, 2017.
- [25]. Шихов А.Н., Свиязов Е.М. Прогнозирование динамики процесса снеготаяния на Западном Урале с применением мезомасштабной модели WRF/ARW. Современные проблемы науки и образования, 2013 г., вып. 4. / Shikhov A.N., Sviyazov E.M. forecasting of the dynamics of snow melting in the Western Ural region, using WRW/ARW mesoscale model, issue 4, 2013.
- [26]. Набокова Е.В. Опыт применения модели WRF с учетом двух методов параметризации городского подслоя для прогноза температуры воздуха и скорости ветра. Труды Гидрометцентра России, 2010 г., вып. 344, стр. 180-195. / Nabokova E. V. The experience of using the WRF model in respect 2 parameterization methods of urban sub-layer for wind velocity and temperature prediction. Proceedings of the Hydrometcentre of Russia, Atmospheric physics and weather forecast, issue 344, 2010, pp. 180-195 (in Russian).
- [27]. Fitch, A. C. et al. Local and Mesoscale Impacts of Wind Farms as Parameterized in a Mesoscale NWP Model. Monthly Weather Review, vol. 140, no. 9, 2012, pp. 3017-3038.