УДК 620.9

ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ МАССИВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ FM 12 SYNOP И METAR В СИСТЕМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Карамов Дмитрий Николаевич[1,2],
dmitriy.karamov@mail.ru

[1] Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

[2] Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность работы обусловлена отсутствием единой концепции учета природно-климатической обстановки в системных исследованиях в энергетике.

Цель работы: *продемонстрировать возможность использования многолетних метеорологических рядов с международными кодами FM 12 Synop и METAR, зафиксированных на ближайшей от рассматриваемого объекта метеостанции, для воспроизведения природно-климатической обстановки с фиксированным расчетным шагом на протяжении всего цикла расчетного периода; показать значимость многолетних метеорологических рядов при решении глобальной задачи оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии с применением хронологического метода расчета системы.*

Методы исследования. *Представленная концепция последовательно выстроена на основополагающих положениях теории системных и междисциплинарных исследований с привязкой к апробированным математическим моделям, позволяющим как обрабатывать, так и моделировать природно-климатические показатели с фиксированным дискретным шагом. В работе использованы многолетние метеорологические ряды с международными кодами FM 12 Synop и METAR, зафиксированные на различных метеостанциях Республики Якутия и штата Аляска. Применяется высокоуровневый язык программирования Matlab.*

Результаты. *Предложена единая концепция воспроизведения актинометрических и ветроэнергетических показателей, а также многих других природно-климатических параметров, имеющих непосредственную связь с задачами системного характера в энергетике. Данная концепция реализована в программно-вычислительном комплексе «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации» с применением высокоуровневого языка программирования Matlab. Представлены результаты обработки многолетних массивов параметров окружающей среды для 22 населенных пунктов, расположенных в различных природно-климатических зонах Республики Якутия и американского штата Аляска. Проведен детальный анализ полученных результатов с соответствующими выводами, визуализацией и заключениями о степени их достоверности и возможности использования в оптимизационных исследованиях автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии с применением хронологического метода расчета системы.*

Ключевые слова:
Возобновляемые источники энергии, солнечная радиация, ветроэнергетический потенциал, метеорологические ряды, системные исследования, оптимизация состава оборудования, хронологический метод.

«Системные исследования в энергетике особенно продуктивны, потому что развитие энергетики в направлении системности уже давно превратилось в объективную необходимость»

академик Лев Александрович Мелентьев, 1983.

Введение

Современные исследования в энергетике являются сложными многогранными задачами, которые имеют множественные связи с различными областями деятельности человека и окружающего мира [1]. Системный подход как направление методологии научного познания позволяет рассматривать различные задачи как целостный комплекс взаимосвязанных элементов [2]. При этом каждый элемент в системе может быть описан различными способами: сложными и упрощенными математическими моделями, статистикой, базами данных и другими формами представления информации [3].

Зачастую системные исследования в энергетике имеют непростые взаимосвязи с множеством других направлений науки, такими как экономика, демография, климатология, экология и т. д. [4–7]. При этом одним из главных условий является высокий уровень детализации при описании как отдельных элементов и взаимосвязей системы, так и всей системы в целом [8, 9]. Такие положения являются основополагающими при решении сложных научно-технических задач системного характера в энергетике.

В течении последних 20 лет мировое развитие энергетики связано с экологически чистыми источниками энергии, такими как энергия ветра и Солнца, микро гидрогенерация, газификация отходов, биотопливо и т. д. [10–17]. По различным оценкам к 2030 г. доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общемировой генерации будет составлять от 30 до 40 % [18, 19]. При этом глав-

ным фактором, стимулирующим подобный сценарий развития, является повышение средней температуры поверхности Земли, вызванное ростом концентрации CO_2 в атмосфере [20].

Подобные вызовы побуждают мировое сообщество к созданию глобальной дорожной карты, включающей международные соглашения об охране окружающей среды, инвестиционные программы, нормативно-правовые акты, стимулирующие развитие экологически чистой энергетики во всем мире. «Киотский протокол» и спустя 20 лет «Парижское соглашение» являются главными катализаторами развития ВИЭ в мире [21, 22]. Кроме того, в различных регионах мира разрабатываются собственные программы, содействующие развитию ВИЭ: зеленые сертификаты, бесплатное подключение к энергетической системе, гарантированная цена и покупка произведенной энергии, налоговые льготы и разные другие преференции [23–26]. Подобные процессы создают благоприятную инвестиционную обстановку развития ВИЭ как в централизованных, так и автономных системах энергоснабжения.

Большое внимание уделяют применению ВИЭ в сельских территориях развивающихся стран, где энергоснабжение непостоянно. При этом доступная энергия значительно улучшает уровень жизни граждан, решает ряд значимых задач социально-экономического характера, уменьшает миграцию в большие города и улучшает экологическую обстановку в регионе [27–31].

Экономическая эффективность использования ВИЭ в автономных системах энергоснабжения достигается за счет замещения доли органического топлива экологически чистой энергией [32–35]. При этом значительная эффективность ВИЭ наблюдается в микросистемах с установленной мощностью генераторов до 100 кВт [36]. Как правило, в системах данного уровня генераторами являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) и ветроэнергетические установки (ВЭУ), которые имеют стохастический характер производства энергии [37]. В таких условиях обоснованно использование аккумуляторных батарей (АБ), выступающих в роли стабилизирующего элемента системы, работающего в буферном режиме [38–43].

Главной задачей, возникающей при использовании ВИЭ и АБ в автономных системах энергоснабжения, является оптимизация [44–51]. Решение задачи оптимизации позволяет определить следующее: оптимальную технологию производства и аккумулирования энергии; оптимальные значения установленной мощности ВИЭ; экономическую и экологическую эффективность и т. д. При этом одним из важных факторов, существенно влияющих на результат оптимизации, является анализ потенциала ВИЭ [52–54].

Обзор подходов к определению потенциала ВИЭ

Потенциал ВИЭ характеризуется количеством суммарной солнечной радиации, поступающей на рассматриваемую территорию и скоростью ветра. Анализ данных показателей можно выполнять различными способами.

- К примеру, использовать реальные измерения солнечной радиации и скорости ветра, выполненные на метеостанции [42, 55–61]. Период измерений может варьироваться от одного года до двадцати лет [62]. Такой подход позволяет максимально точно описывать поведение параметров на рассматриваемой территории.
- Также возможно использование среднесуточной солнечной радиации и скорости ветра, поступающих на рассматриваемую территорию по месяцам года. В таком случае определяется среднемесячное количество солнечных/пасмурных дней и количество часов солнечного сияния. Большую популярность при таком подходе получили открытые базы данных *NASA SSE* [63] и *National Renewable Energy Limited – Solar and Wind Energy Resource Assessment (NREL-SWERA)* [64], позволяющие получить необходимую первоначальную информацию для различных территорий [10, 65–72].
- Особое внимание уделяется программно-вычислительным комплексам (ПВК), позволяющим моделировать солнечную радиацию и скорость ветра. К примеру, ПВК *«ARENA»,* имеющий большую библиотеку распределений, таких как нормальное, логнормальное, бета, Вейбулла, Рэлея, Симпсона, Эрланга и др., позволяет по уже измеренным данным получить массив почасового распределения солнечной радиации. Встроенные алгоритмы ПВК *«ARENA»* дают возможность использовать различные сочетания представленных распределений. Подобные положения справедливы и для моделирования скорости ветра [73–78]. Часто при анализе скорости ветра и солнечной радиации используется ПВК *Transient System Simulation Tool – «TRNSYS»*, имеющего прямую связь с открытыми источниками [79–81]. Также популярны ПВК *«OpenFOAM»* и *«Fluent»* позволяющие моделировать только солнечную радиацию [82, 83]. Отдельно из общего числа выделяется сервис-репозиторий коллективной помощи *GitHub*, имеющий открытые библиотеки, в которых содержатся уже готовые решения для моделирования и анализа как солнечной радиации, так и скорости ветра [84]. При этом данные модели могут быть реализованы с использованием различных языков программирования и находятся в открытом доступе [85]. Следует подчеркнуть, что многие из представленных ПВК и открытых библиотек используют классические подходы для моделирования скорости ветра и солнечной радиации, которые к настоящему времени изучены в достаточно полном объеме.
- К наиболее распространённым математическим моделям солнечной радиации относятся: *P.I. Cooper*, *R.E. Schulze*, *M.A. Atwater*, *M. Iqbal*,

R.E. Bird, *ASHRAE* и многих других [86–91]. При этом данные модели позволяют воспроизводить актинометрические процессы для условий ясного неба *(Clear sky radiation model)*. Следовательно, следующим этапом при моделировании солнечной радиации является учет фактической облачности на рассматриваемой территории. Как уже отмечалось облачность может быть представлена количеством солнечных и пасмурных дней по месяцам года либо реальными многолетними массивами параметров окружающей среды. Данные показатели выступают в качестве входных параметров при определении коэффициентов ослабления как прямой, так и рассеянной солнечной радиации. В качестве общеизвестных моделей учета облачности на рассматриваемой территории можно выделить следующие: *B. Haurwitz*, *M.A. Atwater*, *W.A. Schertzer*, *F. Kasten–G. Czeplak* и других [92, 93]. Следует обратить внимание на то, что возможны различные сочетания представленных моделей [89]. Эти сочетания в первую очередь зависят от уровня детализации первоначальной информации, её соответствующей обработки и т. д.

При моделировании скорости ветра, как уже отмечалось, наибольшую популярность получили различные распределения и их модификации, построенные на основании среднемесячных значений скорости ветра на рассматриваемой территории. Помимо уже представленных выше распределений, которые к настоящему времени считаются классическими подходами, большое распространение и популярность при моделировании скорости ветра получили *искусственные нейронные сети (artificial neural network)* [94, 95].

Недостатки существующих часто используемых подходов

Как видно, к настоящему времени известны различные способы моделирования и анализа как фотоэлектрического, так и ветроэнергетического потенциала рассматриваемой территории. Недостаточное внимание уделяется возможности применения данных способов в системных энергетических исследованиях с ВИЭ и АБ.

К примеру, стоит упомянуть, что среднеквадратичное отклонение для суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации, взятой из *NASA SSE* для территорий, находящихся от 60° до 90° северной широты, имеет значения 34,37, 54,14 и 33,12 % [89]. Более детально с проблематикой использования открытой базы данных *NASA SSE* для территории России можно ознакомиться в [89]. В то же время использование сервиса *NREL-SWERA* оправдано для территории США (за исключением штата Аляска), латинской Америки, части юго-восточной Азии и отдельных стран Ближнего Востока. При этом сервис *NREL-SWERA* для оставшихся территорий мира выводит данные солнечной радиации и скорости ветра, взятые из открытой базы данных *NASA SSE*. К примеру, в атласе возобновляемой энергетики штата Аляска данные о ветроэнергетическом потенциале взяты из сервиса *NREL-SWERA*, а актинометрические показатели – из *NASA SSE* [96].

Особое внимание следует уделить ПВК, использующим данные типичного метеорологического года *(typical meteorological year – TMY)* [97]. К таким ПВК относятся уже отмеченный *«TRNSYS»* и *«PVSyst»* [98]. Использование такого подхода при решении задачи оптимизации систем с ВИЭ и АБ является малопригодным, так как он не учитывает изменчивость основных метеорологических параметров исходя из года, месяца, дня и часа расчетного периода. Более того, такой подход не позволяет в полном объеме рассмотреть задачу работоспособности системы с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений как по отдельным элементам системы, так и всей системы в целом.

Популярная математическая модель солнечной радиации *ASHRAE*, реализованная в рамках ПВК *«OpenFOAM»* и *«Fluent»*, не учитывает изменение альбедо земной поверхности, альбедо облаков, изменение толщины озонового слоя, наличия аэрозолей, Релеевского рассеивания, цикличные отражения солнечной радиации между поверхностью Земли и нижними слоями атмосферы после её первого прохождения [91]. При этом, согласно [91], отсутствие учета вышеописанных показателей в рамках модели *ASHRAE* не приводит к серьезным последствиям. Однако отсутствие учета вышеуказанных показателей приводит к наименее точному учету рассеянной солнечной радиации (и как следствие суммарной) на рассматриваемой территории. Стоит отметить, что для более точного результата анализа фотоэлектрического потенциала территорий с умеренно-континентальным, резко-континентальным и субарктическим климатом, где альбедо земной поверхности в течение года изменяется от 0,15 в летний до 0,75–0,8 в зимний период, необходимо производить расчеты, относительно рассматриваемого дискретного шага (месяц, день, час) расчетного периода.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при анализе фотоэлектрического и ветроэнергетического потенциалов нет единой концепции, отвечающей необходимым требованиям при решении различных задач системного характера в энергетике. Особенно ярко это выражается в задачах оптимизации состава оборудования, использующего ВИЭ и АБ с применением *хронологического метода* моделирования системы, который по мнению многих исследовательских коллективов является одним из самых эффективных способов решения подобного рода задач [16–17, 32–33, 76, 99]. Однако важной составляющей при использовании данного метода является учет изменчивости природно-климатических показателей по годам расчетного периода, который, как правило, составляет до 20 лет (175200 часов). Подобные условия, возникающие в

системных исследованиях в энергетике, стимулируют развитие существующих подходов, а также создают благоприятную обстановку к созданию новых концепций анализа параметров окружающей среды, опирающихся на многолетние метеорологические ряды, находящиеся в открытом доступе.

При этом использование данных, полученных в рамках единой концепции воспроизведения не только ветроэнергетических и фотоэлектрических потенциалов, а в целом природно-климатической обстановки на рассматриваемой территории, позволяет решать поставленную задачу на более высоком уровне, что значительно увеличивает требования к математическим моделям как отдельных связей и элементов рассматриваемой системы, так и всей системы в целом.

Базисные положения предлагаемой концепции

Предлагаемая, в рамках данной статьи, концепция не ограничивается определением фотоэлектрического и ветроэнергетического потенциалов, отвечающих за возможную генерацию ВЭУ и ФЭП, а направлена на максимально детализированное воспроизведение природно-климатической обстановки на рассматриваемой территории. Предполагается, что полученные, с использованием данной концепции, результаты будут интегрироваться в системные энергетические исследования. На рис. 1. показаны сопутствующие задачи, имеющие ярко выраженную связь с природно-климатическими показателями при оптимизационных исследованиях автономных энергетических комплексов, использующих ВИЭ и АБ.

Также в рамках предлагаемой концепции подразумевается использование многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе, использующих международные метеорологический коды *FM 12 Synop* или *METeorological Aerodrome Report (METAR)*. Стоит отметить, что даже для самых удаленных населенных пунктов (н.п.) России количество лет метеонаблюдений составляет не менее 8. При этом данные массивы выполнены на основании *срочных измерений* (каждые 3 часа).

Главным свойством предлагаемой концепции является полное сочетание *хронологического метода* расчета системы при решении глобальной задачи оптимизации состава оборудования, использующего ВИЭ и АБ с многолетними метеорологическими рядами, которые в своей природе учитывают последовательность смены метеопараметров. Более того, так как все метеорологические параме-

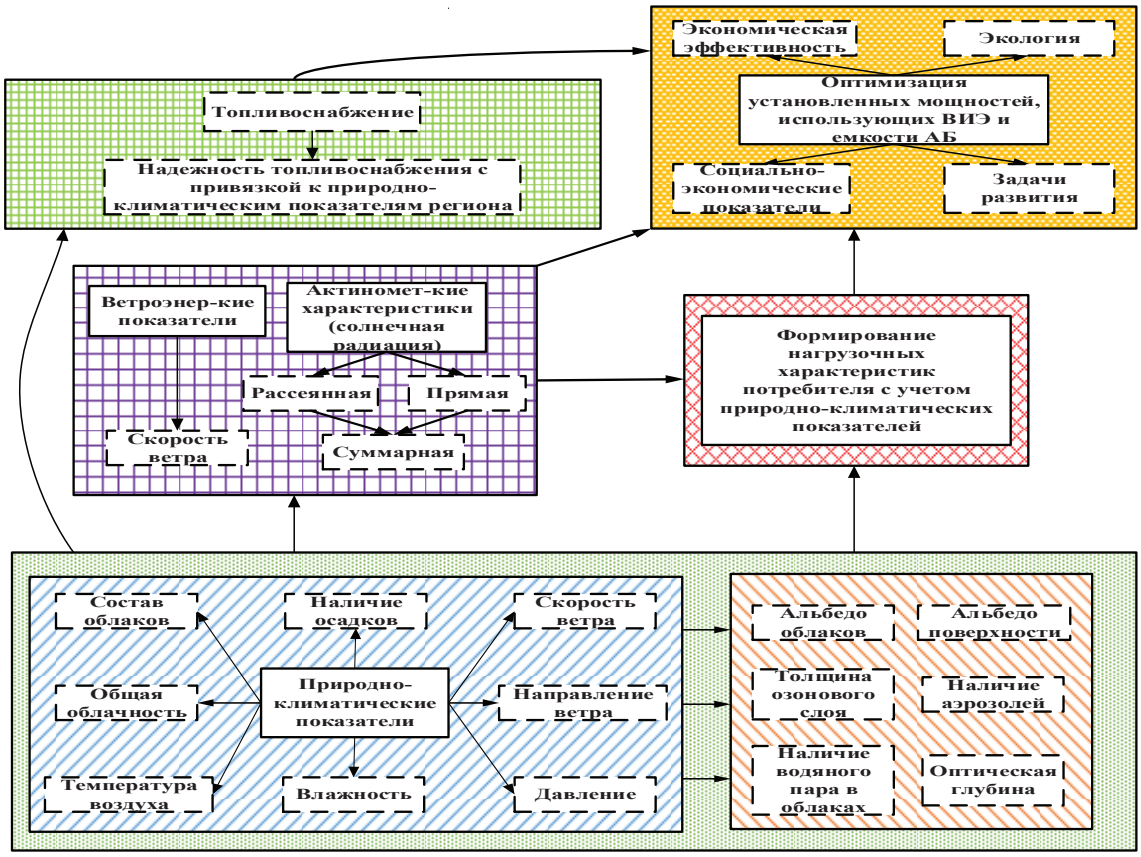


Рис. 1. *Задачи, имеющие непосредственную связь с природно-климатическими показателями в рамках решения глобальной задачи оптимизации состава оборудования автономных энергокомплексов с ВИЭ и АБ*

Fig. 1. *Tasks that have direct relation to climatic indicators within the framework of the task of optimization of installation power which use renewable energy sources (RES) and storage batteries (SB)*

тры зафиксированы одновременно, корреляция между ними учитывается неявным образом.

Важной составляющей является то, что при воспроизведении природно-климатической обстановки используется информация, полученная непосредственно с метеостанции.

По мнению автора статьи, разработка подобной концепции, свободной от вышеописанных недостатков, имеющихся подходов, позволит существенно увеличить точность, получаемых результатов в рамках решения различных задач системного характера в энергетике.

Содержательное описание

Многолетние метеорологические ряды, полученные на основании *срочных (FM 12 Synop)* или *ежечасных (METAR)* измерений, являются достаточно детализированной информацией. При этом международные коды *FM 12 Synop* и *METAR* имеют одинаковые показатели приборных измерений, а именно: скорость и направление ветра, температура воздуха, давление, влажность и отдельно качественная оценка общей облачности.

Матрица приборных измерений (A_m^k) *k-го* года расчетного периода, включая качественную оценку общей облачности

$$A_m^k = \begin{bmatrix} t & v_{wind} & T_{air} & p_{air} & \varphi_{\%} & \wp_{\%cloud} \\ t_0 & \upsilon_0 & T_0 & p_0 & \varphi_0 & \wp_0 \\ t_1 & \upsilon_1 & T_1 & p_1 & \varphi_1 & \wp_1 \\ t_2 & \upsilon_2 & T_2 & p_2 & \varphi_2 & \wp_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & \upsilon_n & T_n & p_n & \varphi_n & \wp_n \end{bmatrix}.$$

Стоит отметить, что код *FM 12 Synop* содержит более детальную информацию качественной оценки облачности, состава и высоты облаков, процент облаков плохой погоды, облака нижнего яруса (слоисто-кучевые, слоистые, слоисто-дождевые, кучево-дождевые), облака среднего яруса (высококучевые, кучевые, высокослоистые), облака верхнего яруса (перистые, перисто-кучевые и перистослоистые облака). В международном коде *METAR* качественная оценка облачности послойно записана в вектор-столбце, что значительно усложняет их обработку за счет построчного сравнения *эталонных* (*словесных*) значений массива относительно каждого временного интервала *k-го* года расчетного периода.

Матрица качественной оценки облачности (B_m^k) *k*-го года расчетного периода для *FM 12 Synop*

$$B_m^k = \begin{bmatrix} t & C_{lt} & C_{mt} & C_{ht} & b_{\%cloud} \\ t_0 & C_{lt0} & C_{mt0} & C_{ht0} & b_0 \\ t_1 & C_{lt1} & C_{mt1} & C_{ht1} & b_1 \\ t_2 & C_{lt2} & C_{mt2} & C_{ht2} & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & C_{lt-n} & C_{mt-n} & C_{ht-n} & b_n \end{bmatrix}.$$

Матрицы приборных измерений (A_m^k) и качественной оценки облачности (B_m^k) объединяются единую матрицу природно-климатических показателей, где каждая строка есть вектор, характеризующий фактические значения параметров окружающей среды в опорных точках

$$x_i^{p,k} = \begin{pmatrix} v_{wind-i}^{p,k}, T_{air-i}^{p,k}, p_{air-i}^{p,k}, \varphi_{\%-i}^{p,k}, \wp_{\%cloud-i}^{p,k}, \\ C_{lt-i}^{p,k}, C_{mt-i}^{p,k}, C_{ht-i}^{p,k}, b_{\%cloud-i}^{p,k} \end{pmatrix},$$

при $t=t_i$, $i=1...n$,

где $x_i^{p,k}$ – вектор, характеризующий состояние всех параметров окружающей среды относительно момента t_i в опорных точках *k*-го года.

При этом числовые значения параметров окружающей среды принимаются равными опорным значениям, замеренным на соответствующем трехчасовом или одночасовом временном интервале *k*-го года расчетного периода

$$x_i^{b,k} = \begin{Bmatrix} x_i^{p,k}, \text{при} \quad t = \Delta t_i \\ x_{i-1}^{p,k}, \text{при} \quad \Delta t_i > t < \Delta t_{i+1} \end{Bmatrix},$$

где $\Delta t_i = \{3,6,9,...n\}$ для *FM 12 Synop*
и $\Delta t_i = \{1,2,3,...n\}$ для *METAR*.

Иногда числовые значения параметров окружающей среды в опорных точках отсутствуют. Это, как правило, связано со сбоями работы метеорологической станции, которая по каким-либо причинам не смогла предоставить необходимую информацию в заявленный срок. Как показывает практика, наиболее часто подобные ситуации происходят с многолетними массивами с кодом *FM 12 Synop*, в то время как в массивах *METAR* такие моменты практически отсутствуют. Это связано с тем, что метеостанции, входящие в состав оборудования аэропорта, имеют большую надежность за счет резервных источников электроэнергии и дополнительных каналов связи.

Поэтому, если вектор-строка не имеет числовых значений $x_i^{p,k}=NaN$(*Not-a-Number*), а последующая опорная точка свидетельствует о наличии, недостающих данных в предыдущих вектор-строках вследствие каких-либо причин, то создается массив нулевых значений $x_i^{p-zm,k}$ *k*-го года расчетного периода, где соответствующая вектор-строка заполняется данными исходя из следующих условий:

$$x_i^{p\text{-}zm,k} = \begin{Bmatrix} x_{i-1}^{p,k}; (x_{i-1}^{p,k} \le x_{i+1}^{p,k}) \wedge (x_{i+1}^{p,k} < x_{i-1}^{p,k} \cdot q^s) \\ \dfrac{(x_{i-1}^{p,k} + x_{i+1}^{p,k})}{2}; (x_{i-1}^{p,k} > x_{i+1}^{p,k}) \wedge (x_{i+1}^{p,k} > x_{i-1}^{p,k} \cdot q^s) \\ 0; x_i^{p,k} \ne NaN \end{Bmatrix}.$$

Данные условия выполняются в случае, когда временной интервал между $x_{i-1}^{p,k}$ и $x_{i+1}^{p,k}$ составляет от одного до трех часов, то есть исходя из Δt_i рассматриваемого кода метеорологических данных. При аналогичной ситуации с качественной оценкой облачности многолетних массивов *FM 12 Synop* числовые значения в опорных точках принимают-

ся равными значениям предыдущей имеющейся вектор-строки.

В случае отсутствия данных и нахождении временного интервала между $x_{i-1}^{p,k}$ и $x_{i+1}^{p,k}$ от трех, но не более двадцати четырёх часов, записывается уравнение прямой через имеющиеся опорные точки, где с дискретным шагом в один час находятся необходимые значения отсутствующих метеорологических параметров. Аналогично определяются числовые значения качественной оценки облачности с округлением до *ближайшего* целого значения.

$$x_i^{p,k} = \begin{bmatrix} t_1 & a_1 & b_1 & c_1 \\ t_2 & a_2 & b_2 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_5 & a_5 & b_5 & c_5 \\ t_n & a_n & b_n & c_n \end{bmatrix} \quad x_i^{p\text{-}zm\ k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_3 & a_3 & b_3 & c_3 \\ t_4 & a_4 & b_4 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_n & a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}.$$

$$\downarrow$$

$$x_i^{p,k} = \begin{bmatrix} t_1 & a_1 & b_1 & c_1 \\ t_2 & a_2 & b_2 & c_2 \\ t_3 & a_3 & b_3 & c_3 \\ t_4 & a_4 & b_4 & c_4 \\ t_5 & a_5 & b_5 & c_5 \\ t_n & a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}$$

Более длительные провалы метеонаблюдений встречаются довольно редко. Однако в случае их обнаружения выполняется следующий алгоритм. Сравниваются все числовые значения рассматриваемого года относительно временных интервалов t_i с числовыми значениями других лет метеорологических наблюдений, и недостающие данные принимают значения данных самого схожего года.

После того как все недостающие числовые значения метеорологических параметров в опорных точках восстановлены, далее по уже ранее озвученному сценарию выполняется определение значений промежуточных вектор-строк $x_i^{b,k}$.

Также в рамках данной концепции используются информация об изменении вертикальной толщины озонового слоя, наличии капель воды и пара в облаках и т. д. Данные показатели находятся в свободном доступе в электронных архивах *World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOURDC)* и *AErosol RObotic NETwork (AERONET)*. Отметим, что данные показатели необходимы для более точного определения актинометрических характеристик рассматриваемого района. В целом их обработка выполняется аналогично обработке данных для многолетних метеорологических рядов с международными кодами *FM 12 Synop* и *METAR*.

Программно-вычислительный комплекс

Представленная концепция реализована в ПВК «*Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации*».

При определении актинометрических показателей, а именно прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, использовался *тандем* математических моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak*. Данные математические модели являются наиболее пригодными для воспроизведения фактических значений прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации на рассматриваемой территории с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе. В целом определение актинометрических показателей является отдельным самостоятельным исследованием, поэтому с основными положениями, использования моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak* для различных н.п. России в т. ч. за полярным кругом, можно ознакомиться в [89].

Работу ПВК можно представить следующей укрупненной блок-схемой (рис. 2).

Программно-вычислительный комплекс реализован на высокоуровневом языке программирования *Matlab*. При исследовании использовался компьютер со следующими характеристиками: Intel(R) Core ™ i5–4690, 4×3.50 GHz, 8 Gb RAM [89].

Объекты исследования

В качестве объектов исследования были выбраны н.п., расположенные на территории *Дальнего Востока* России и американского штата *Аляска*. Такой выбор сделан не случайно. К примеру, даже в небольших н.п., расположенных на территории штата *Аляска*, находится небольшой аэропорт, в котором имеется метеостанция, передающая погодную сводку с международным кодом *METAR*. На территории России распространена обширная сеть метеостанций. Так, например, даже в рамках отдельного небольшого района, находящегося в составе субъекта РФ, имеется от 2 до 4 стационарных метеостанций, работающих с международным кодом *FM 12 Synop*.

В табл. 1 представлены н.п., географические координаты, количество лет метеонаблюдений и код передачи метеорологических данных.

Как видно, минимальное число лет метеонаблюдений для массивов *FM 12 Synop* составляет 8, в то время как для *METAR* – 5 лет. Стоит отметить, что размерность исходных массивов рассматриваемых объектов составляет от 43800×13 до 61320×13 для *METAR* и 35040×26 для *FM 12 Synop*. Данные массивы загружаются в рабочую область ПВК для дальнейшей автоматической обработки, анализа и выводов.

Численные результаты

Так как при воспроизведении природно-климатической обстановки *итоговый многолетний массив параметров окружающей среды* имеет большую размерность, а его описание относительно *k-го* года, месяца и т. д. расчетного периода является достаточно объемным материалом, то в рамках данной статьи относительно каждого рассматриваемого н.п. будут выделяться только основные при-

Рис. 2. *Блок-схема укрупненно описывающая основные этапы работы ПВК «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации»*

Fig. 2. *Block-diagram describing basic steps of operation of the software «Local analysis of environmental parameters and solar radiation»*

родно-климатические показатели, имеющие значительное влияние на результат оптимизационных исследований автономных энергетических комплексов, использующих ВИЭ и АБ. В табл. 2 представлены осредненные по годам расчетного периода актинометрические и ветроэнергетические показатели в рассматриваемых н.п.

Представленные численные результаты расчета получены на основании обработки многолетних массивов параметров окружающей среды. Однако, по мнению автора статьи, при решении сложных задач оптимизационно-прикладного характера с использованием ВИЭ и АБ требуется гораздо более узконаправленная информация, имеющая непосредственную связь с возможными вариантами компоновки рассматриваемого объекта.

Обсуждение полученных результатов

Анализ полученных результатов относительно рассматриваемых районов/боро позволяет выявить определенные закономерности, присущие только рассматриваемой территории.

1. *Олекминский район.* В целом полученные результаты показывают достаточно высокие и равномерно распределенные значения актинометрических показателей. Скорость ветра в рамках рассматриваемого района характеризуется достаточно низкими значениями, не превышающими 3 м/с.
2. *Нижнеколымский район.* Высокоширотное расположение рассматриваемого района существенно сказывается на показателях как прямой, так и рассеянной солнечной радиации. Более детально представим показатели скорости ветра для следующих н.п.
   - *Амбарчик.* Данный н.п. находится на побережье *Колымского залива*, поэтому наличие крупного водного объекта существенно сказывается на показателях скорости ветра. На рис. 3 показано изменение среднемесячной скорости ветра относительно 12 лет расчетного периода по данным многолетних метеорологических наблюдений.

При этом важной составляющей является количество часов, при которых скорость ветра превышает определенный установленный порог. Как правило, этот порог устанавливается исходя из характеристик используемого ветроэнергетического оборудования. На практике часто используется значение скорости ветра, при котором ВЭУ выходит на номинальный режим работы. На рис. 4 показано количество часов в месяце, при которых скорость ветра >5 м/с относительно каждого года расчетного периода.

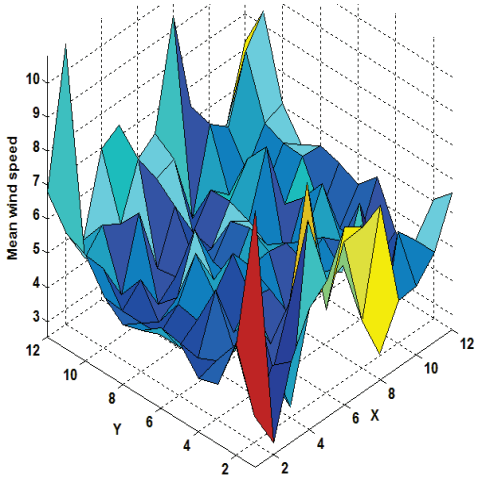
Таблица 1. *Общие сведения о рассматриваемых объектах*

Table 1. *Overview the objects under consideration*

Страна, субъект Country, subject	Район/боро District/barough	Населенный пункт Settlement	Географические координаты Geographical coordinates*	Кол-во лет наблюдений Number of years of observations	Код передачи данных Data transfer code**
РФ/Russia, Респ. Якутия Yakutia	Олекминский Olyokminsky	Тинная/Tinnaya	60,21; 116,97	8	1
		Теген/Tegen	61,02; 119,10	8	
		Олом/Olom	60,44; 119,28	8	
		Саныяхтах/Sanyyakhtakh	60,60; 124,08	12	
		Бясь-Кюель/Byas-kuel	59,46; 119,28	10	
	Нижнеколымский Nizhnekolymsky	Амбарчик/Ambarchik	69,61; 162,28	12	
		Колымское/Kolymskoe	68,71; 158,70	12	
		Андрюшкино/Andryushkino	70,66; 154,43	12	
	Сунтарский Suntarsky	Крестях/Krestyakh	62,25; 116,16	8	
		Сунтар/Suntar	61,02; 117,63	12	
		Нерюктяй/Neryuktyay	62,78; 117,41	12	
США/USA, Штат Аляска Alaska	Алеутские острова Aleutian Islands	Адак/Adak	51,88; 176,63	5	2
		Атка/Atka	52,18; 174,20	5	
		Якутат/Yakutat	59,53; 139,70	12	1
		Кадьяк/Kodiak	57,78; 152,38	12	
		Колд-Бей/Cold-Bay	55,20; 162,70	12	2
	Юкон-Коюкук Yukon-Koyukuk	Форт Юкон/Fort Yukon	66,56; 145,25	7	
		Беттлс/Bettles	66,90; 151,51	12	
		Мак-Грат/McGrath	62,57; 155,56	12	
	Ном Nome	Ном/Nome	64,50; 165,40	8	1
		Уэйлс/Wales	65,93; 167,71	12	2
		Диомид/Diomede	65,75; 168,95	12	

** Для территории РФ – восточная долгота, США – западная долгота; ** 1 – FM 12 Synop, 2 – METAR.*

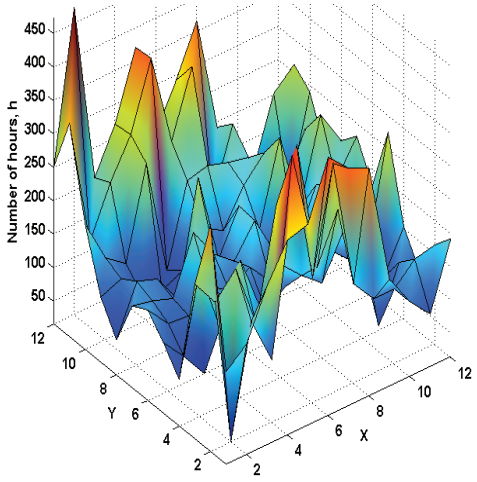
** For the territory of the Russian Federation – eastern longitude, USA – western longitude.*



X – номер года/Number of year
Y – номер месяца/Number of month

Рис. 3. *Среднемесячная скорость ветра по месяцам расчетного периода в н.п. Амбарчик*

Fig. 3. *Average monthly wind speed in months of the calculation period in Ambarchik*



X – номер года/Number of year
Y – номер месяца/Number of month

Рис. 4. *Количество часов по месяцам расчетного периода при скорости ветра >5 м/с в н.п. Амбарчик*

Fig. 4. *Number of hours per month of the estimated period at speed wind >5 m/s in Ambarchik*

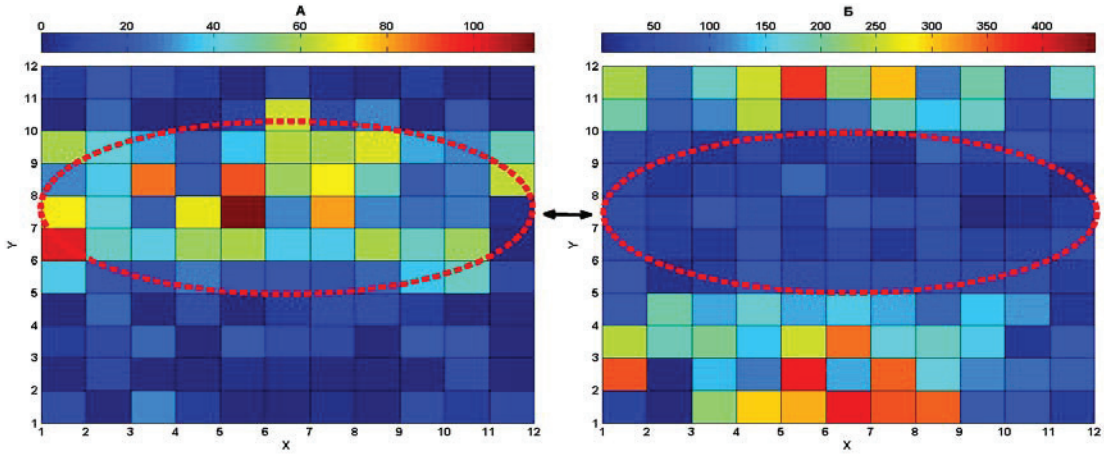
Таблица 2. *Осредненные по годам расчетного периода актинометрические и ветроэнергетические показатели*
Table 2. *Actinometric and wind energy indicators averaged over the years of the calculation period*

Населенный пункт Settlement	Солнечная радиация, кВт·ч/м² Solar radiation kW·h/m² (min/max)	Среднекв-ое отклонение, % Standard deviation, %	Коэффициент осцилляции, % Oscillation coefficient, %	Среднемесячная скорость ветра, м/с Average monthly wind speed, m/s	Направление ветра, %* Wind direction, %*
Тинная/Tinnaya	1189/1153	11	3	1,6; 1,4; 1,7; 1,9; 2,0; 1,7; 1,6; 1,6; 1,6; 1,9; 1,5; 1,4	N-7; S-9; W-5; E-1; «0»-78;
Саныяхтах Sanyyakhtakh	1154/1101	15	4	1,7; 1,3; 1,1; 1,4; 1,6; 1,4; 1,4; 1,6; 1,7; 1,6; 1,5; 1,5	N-7; S-11; W-21; E-8; «0»-53;
Олом/Olom	1141/1105	10	3	1,3; 1,4; 1,9; 2,0; 2,3; 1,5; 1,2; 1,2; 1,4; 1,8; 1,2; 1,1	N-13; S-18; W-12; E-2; «0»-55
Теген/Tegen	1145/1112	10	3	1,3; 1,4; 1,9; 2,0; 2,3; 1,5; 1,2; 1,2; 1,4; 1,8; 1,2; 1,1	N-13; S-18; W-12; E-2; «0»-55
Бясь-Кюель/Byas-kuel	1192/1150	13	3	0,2; 0,3; 0,6; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,6; 0,6; 0,4; 0,2	N-7; S-3; W-0; E-0; «0»-90
Амбарчик/Ambarchik	849/789	18	7	6,2; 5,0; 4,9; 4,4; 4,6; 4,8; 4,6; 4,8; 4,6; 5,0; 6,0; 6,8	N-8; S-54; W-4; E-8; «0»-26
Колымское/Kolymskoe	894/812	28	9	2,5; 2,5; 2,7; 2,9; 3,2; 3,4; 3,2; 3,2; 3,2; 2,8; 2,8; 3,1	N-20; S-35; W-7; E-9; «0»-29
Андрюшкино Andryushkino	808/765	15	6	2,0; 2,2; 2,1; 2,6; 3,4; 4,0; 3,7; 3,6; 3,4; 2,5; 2,5; 2,4	N-25; S-37; W-3; E-5; «0»-30
Крестях/Krestyakh	1121/1078	12	4	0,8; 0,9; 1,4; 1,8; 2,2; 1,9; 1,7; 1,6; 1,7; 1,8; 0,9; 0,6	N-12; S-25; W-5; E-1; «0»-57
Сунтар/Suntar	1198/1145	16	4	1,3; 1,4; 1,6; 1,9; 2,2; 1,9; 1,7; 1,7; 1,9; 1,9; 1,3; 1,0	N-13; S-44; W-6; E-2; «0»-35
Нерюктяй/Neryuktyay	1121/1066	17	5	1,8; 1,7; 1,8; 2,2; 2,7; 2,3; 2,0; 1,9; 2,1; 2,3; 1,7; 1,4	N-15; S-39; W-7; E-3; «0»-35
Адак/Adak	1319/1235	30	7	5,8; 6,7; 7,0; 6,5; 6,1; 5,3; 4,5; 5,5; 6,0; 7,5; 7,9; 7,5	N-18; S-31; W-10; E-5; «0»-36
Атка/Atka	1321/1345	28	8	5,7; 6,8; 7,1; 6,4; 6,3; 5,1; 4,6; 5,4; 6,2; 7,8; 7,7; 7,6	N-19; S-30; W-11; E-4; «0»-36
Якутат/Yakutat	1212/1122	27	8	2,3; 2,0; 2,0; 1,7; 1,9; 1,6; 1,5; 1,5; 1,9; 1,9; 2,2; 2,1	N-5; S-22; W-2; E-17; «0»-54
Кадьяк/Kodiak	1198/1157	14	4	4,8; 4,8; 4,9; 4,5; 3,9; 3,5; 3,1; 3,0; 3,4; 4,2; 4,8; 5,0	N-19; S-19; W-9; E-7; «0»-47
Колд-Бей /Cold-Bay	1264/1151	30	9	6,7; 6,9; 6,6; 6,9; 6,2; 6,2; 6,0; 5,9; 6,6; 6,7; 7,3; 7,3	N-18; S-41; W-9; E-2; «0»-30
Форт Юкон/Fort Yukon	885/837	15	6	1,5; 1,5; 2,5; 3,1; 2,6; 2,3; 2,3; 1,9; 2,3; 2,0; 1,2; 1,4	N-24; S-12; W-4; E-1; «0»-58
Беттлс/ettles	858/829	8	3	1,5; 1,7; 2,0; 2,2; 2,1; 1,7; 1,6; 1,3; 1,6; 1,8; 1,7; 1,6	N-23; S-20; W-1; E-0; «0»-55
Мак-Грат/McGrath	1011/974	11	4	0,9; 1,2; 1,6; 1,9; 2,0; 1,8; 1,7; 1,5; 1,5; 1,6; 1,2; 0,8	N-11; S-19; W-4; E-2; «0»-63
Ном/Nome	912/889	7	2	4,2; 4,1; 3,1; 3,2; 3,5; 3,9; 4,0; 3,8; 3,7; 4,0; 4,1; 4,3	N-19; S-22; W-5; E-10; «0»-43
Уэйлс/Wales	989/909	25	8	5,5; 5,3; 4,3; 4,4; 4,8; 5,4; 5,6; 5,9; 6,5; 6,9; 7,6; 7,2	N-29; S-30; W-2; E-3; «0»-36
Диомид/Diomede	965/892	26	8	5,8; 5,8; 4,7; 4,6; 5,6; 5,7; 5,9; 6,3; 6,9; 7,2; 7,9; 7,4	N-35; S-33; W-2; E-3; «0»-27

** N – Север/North; S – Юг/South; W – Запад/West; E – Восток/East; «0» – Штиль/Calm.*

Помимо количества часов, при которых скорость ветра превышает некоторое пороговое значение, также необходимо анализировать направление ветра, при котором выполняются вышеописанные условия. На рис. 5 показано суммарное количество часов, при которых скорость ветра>5 м/с относительно **А** – *северного* и **Б** – *южного* направления в н.п. *Амбарчик* на протяжении всего цикла расчетного периода.

Из рис. 5 видно, что в течение *зимнего* и *осеннего* периода ветер, превышающий 5 м/с, возникает с *южного* направления, включающего *юго-западное* и *юго-восточное* направления. При этом в *весенний* и *летний* периоды направление ветра (>5 м/с) меняется на *северное*, включающее *северо-западное* и *северо-восточное*. Причем, подобная ситуация возникает ежегодно. Цикличность продиктована наступающими из года в год *барически-*



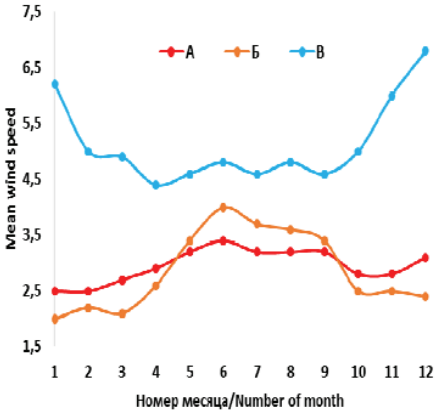
X – номер года/Number of year, **Y** – номер месяца/Number of month,
А – северное/North и **Б** – южное направление/South direction

Рис. 5. *Количество часов, при которых скорость ветра>5 м/сек относительно направления ветра в н.п. Амбарчик на протяжении всего цикла расчетного периода*

Fig. 5. *Number of hours when wind speed is >5 m/s relative to the direction of the wind in Ambarchik throughout the whole cycle of the calculation period*

ми депрессиями, отвечающими за долгосрочную (сезонную) климатическую обстановку на рассматриваемой территории [89].

- *Колымское, Андрюшкино.* За счет относительно близкого расположения данных н.п. актинометрическая и ветроэнергетическая обстановка в целом имеет схожий характер. Однако за счет значительного удаления от *Колымского залива* средняя скорость ветра существенно ниже по сравнению с *Амбарчик* (рис. 6).



А – Колымское/Kolymskoe
Б – Андрюшкино/Andryushkino
В – Амбарчик/Ambarchik

Рис. 6. *Среднемесячная скорость ветра в н.п. Колымское, Андрюшкино, Амбарчик*

Fig. 6. *Average monthly wind speed in Kolymskoe, Andryushkino, Ambarchik*

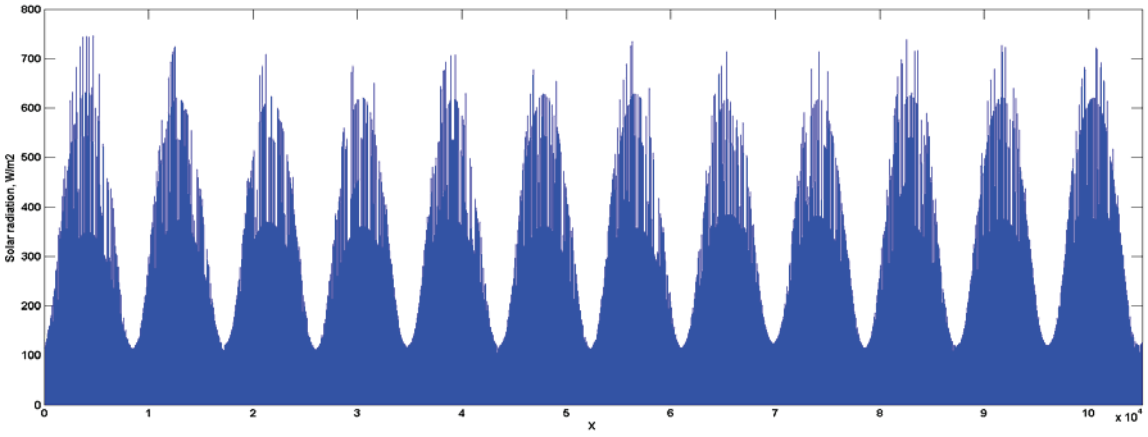
3. *Сунтарский район*. Данный район расположен в центральной части Республики *Якутия*. В целом актинометрические показатели в н.п. *Крестях*, *Сунтар*, *Нерюктяй* имеют достаточно высокий уровень. Среднеквадратичное отклонение находится в диапазоне от 12 до 17 %, а коэффициент осцилляции не более 5 %. Детализированный анализ скорости ветра показывает, что ветроэнергетический потенциал на рассматриваемой территории является низким и не превышающим 3 м/с.
4. *Алеутские острова боро*. Рассматриваемое боро является архипелагом вулканического происхождения, находящегося в относительной близости к *Беринговому морю* и *Тихому океану*.
   - *Адак*, *Атка*, *Кадьяк*, *Колд-Бей*. Рассматриваемые н.п. характеризуются высокими показателями солнечной радиации относительно всего цикла расчетного периода. На рис. 7 показано поведение суммарной солнечной радиации на протяжении 12 летнего цикла расчетного периода (105120 часов) в н.п. *Адак*.

На рис. 8 продемонстрированы характеристики среднемесячной солнечной радиации в н.п. *Адак*, *Атка*, *Кадьяк*, *Колд-Бей*.

Анализ скорости ветра показывает достаточно высокие показатели. При этом необходимо выделить *северное* и *южное* направление со стороны *Берингова моря* и *Тихого океана* (табл. 2).

На рис. 9 показаны осредненные временные показатели, характеризующие количество часов, при которых скорость ветра>5 м/с в н.п. *Адак*, *Атка*, *Кадьяк*, *Колд-Бей*.

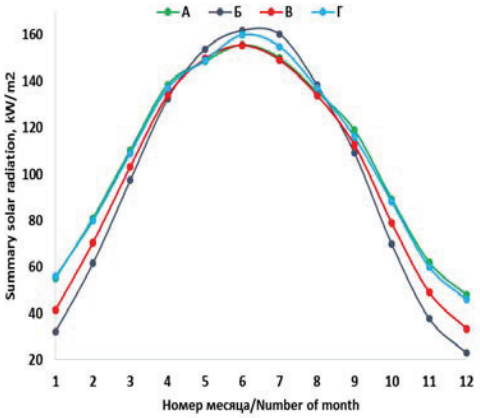
5. *Юкон-Коюкук боро*. Является крупнейшим боро штата *Аляска* и расположена в центральной его части. Актинометрические показатели варьируются в зависимости от широтного расположения, рассматриваемых н.п. и фактической облачности. Ветроэнергетические показатели в целом по рассматриваемым н.п.<3 м/с.
   - *Форт Юкон*, *Беттлс*, *Мак-Грат*.



X – час расчетного периода/Hour of the calculation period

Рис. 7. *Солнечная радиация на протяжении 12 лет расчетного периода в н.п. Адак*

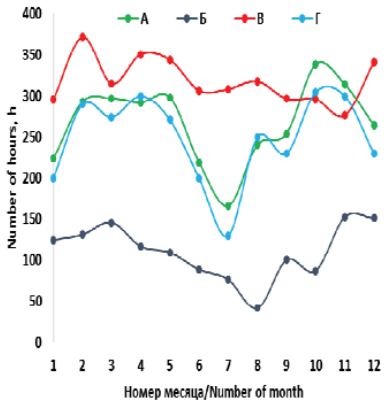
Fig. 7. *Solar radiation for 12 years of the calculation period in Adak*



А – Адак/Adak, **Б** – Кадьяк/Kodiak,
В – Колд-Бей/Cold-Bay, **Г** – Атка/Atka

Рис. 8. *Среднемесячная суммарная солнечная радиация в н.п. Адак, Кадьяк, Колд-Бей, Атка*

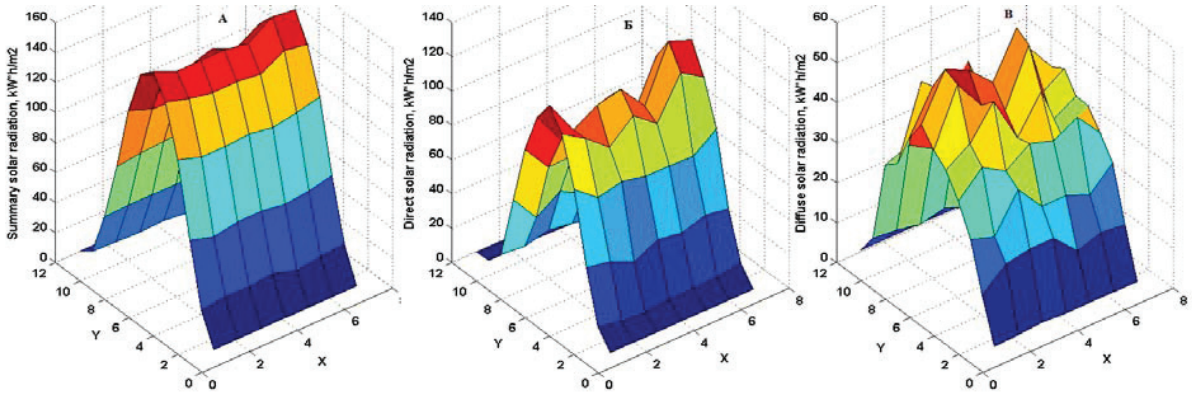
Fig. 8. *Average monthly summary solar radiation in Adak, Kodiak, Cold Bay, Atka*



А – Адак/Adak, **Б** – Кадьяк/Kodiak,
В – Колд-Бей/Cold-Bay, **Г** – Атка/Atka

Рис. 9. *Количество часов, при которых скорость ветра >5 м/с в н.п. Адак, Кадьяк, Колд-Бей, Атка*

Fig. 9. *Number of hours when wind speed is >5 m/s in Adak, Kodiak, Cold Bay, Atka*

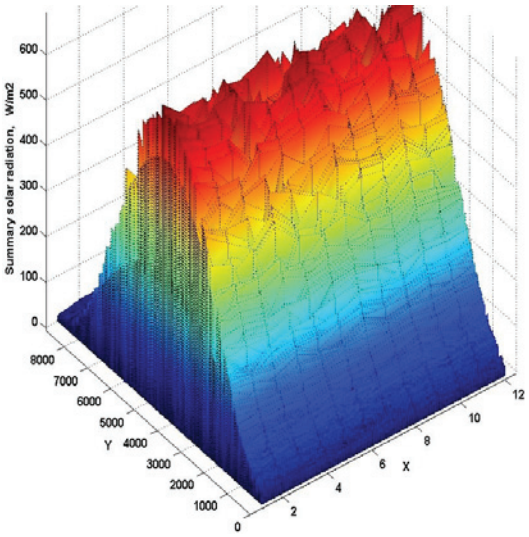


X – номер года/Number of year, **Y** – номер месяца/Number of month

Рис. 10. *А) суммарная; Б) прямая; В) рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в н.п. Форт-Юкон на протяжении 7 лет расчетного периода*

Fig. 10. *А) summary; Б) direct; В) diffuse solar radiation, arriving on horizontal surface in the settlement of Fort Yukon for 7 years of the calculation period*

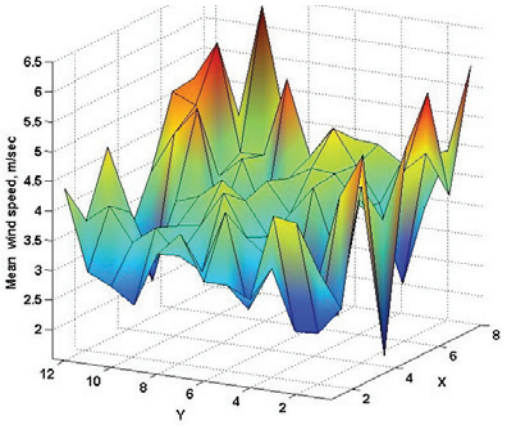
На рис. 11 демонстрируется суммарная солнечная радиация в н.п. *Мак-Грат* относительно каждого часа расчетного периода с учетом фактической облачности на протяжении 12 лет (105120 часов).



X – номер года/Number of year
Y – номер часа/Number of hour

Рис. 11. *Суммарная солнечная радиация в н.п. Мак-Грат относительно каждого часа расчетного периода с учетом фактической облачности на протяжении 12 лет*

Fig. 11. *Summary solar radiation in McGrath for each hour of the calculation period, taking into account the actual cloud cover over 12 years*



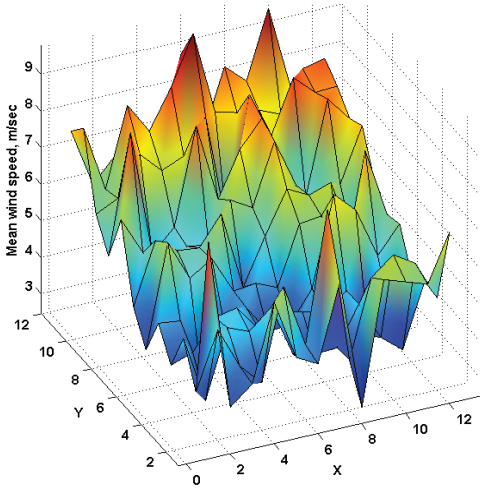
X – номер года/Number of year
Y – номер месяца/Number of month

Рис. 12. *Среднемесячная скорость ветра по месяцам расчетного периода в н.п. Ном*

Fig. 12. *Average monthly wind speed in months of the calculation period in Nome*

6. *Ном боро*. Располагается на западе штата *Аляска* омывается водами *Берингова моря*, *Берингова пролива* и *залива Нортон*.
   - *Ном*, *Уэйлс*, *Диомид*. Актинометрические показатели находятся на среднем уровне и не превышают 1000 кВт·ч/м^2 в год. Скорость ветра в н.п. *Ном* на высоте 10 м находится в диапазоне от 3 до 5 м/с. На рис. 12 показано изменение среднемесячной скорости ветра относительно 8 лет расчетного периода по данным многолетних метеорологических наблюдений.

На рис. 13 показано изменение среднемесячной скорости ветра относительно 12 лет расчетного периода в н.п. *Диомид*.



X – номер года/Number of year
Y – номер месяца/Number of month

Рис. 13. *Среднемесячная скорость ветра по месяцам расчетного периода в н.п. Диомид*

Fig. 13. *Average monthly wind speed in months of the calculation period in Diomede*

Выводы

При воспроизведении природно-климатической обстановки на рассматриваемой территории с использованием многолетних метеорологических рядов с международными кодами *FM 12 Synop* и *METAR* необходимо выделить следующее:

1. Природно-климатическая обстановка в рассматриваемых районах/боро существенно варьируется и зависит от локальных особенностей рельефа местности (равнины, горы, тайга, вулканические образования, крупные водные объекты и т. д.), поэтому использование многолетних метеорологических рядов, взятых с ближайшей от рассматриваемого объекта метеостанции, является одним из эффективных способов учесть локальные особенности рельефа местности.
2. Автоматическая обработка многолетних метеорологических рядов с международными кодами *FM 12 Synop* и *METAR* показала следующее: глубокие метеорологические провалы продолжительностью более недели наблюдались только в многолетних массивах *FM 12 Synop*, в то время как в *METAR* такие моменты отсутствовали. Более того, отсутствие нескольких замеренных значений в опорных точках массива *METAR* не приводит к существенным ошибкам, так как шаг дискретизации измерений равен одному часу.

3. В ряде рассматриваемых районов/боро детальный анализ скорости ветра, его продолжительности, а также направления показал, что из года в год возникают циклические процессы смены направления ветра, связанные с барическими депрессиями (рис. 5). При этом определение временных интервалов, в рамках которых происходит смена барических депрессий, позволяет более точно трактовать результаты оптимизационных исследований исходя из фактических значений скоростных характеристик ветра, его направления и продолжительности относительно каждого временного интервала расчетного периода.
4. При определении актинометрических показателей большое значение имеет широтное расположение рассматриваемого н.п. с учетом астрономических явлений: полярная ночь и полярный день. Населенным пунктам, удаленным от крупных водных объектов (моря, океаны, заливы и т. д.), присуще достаточно равномерное распределение солнечной радиации с уточнением широтного расположения (например, *Олекминский район*, *Юкон-Коюкук* (табл. 2)). Это связано с достаточно равномерным распределением и сменой облачности на рассматриваемой территории. В то же время н.п., расположенные на островах или имеющие непосредственную связь с крупным водным объектом, подвержены более частыми сменами климатической обстановки, что сказывается на результатах моделирования как прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, так и их статистических показателей.

Заключение

В работе представлен детальный обзор наиболее распространённых в мире подходов, используемых при описании параметров окружающей среды в рамках решения задачи оптимизации состава оборудования, использующего ВИЭ. Выделены недостатки существующих подходов, степень их влияния на результаты исследований, на основании которых была сформирована задача разработки единой концепции, позволяющей воспроизводить природно-климатическую обстановку на рассматриваемой территории с последующей интеграцией в задачи системного характера в энергетике.

Приведено описание концепции с использованием многолетних метеорологических рядов с международными кодами *FM 12 Synop* и *METAR*, необходимыми для воспроизведения природно-климатической обстановки в рамках решения глобальной задачи оптимизации состава оборудования с использованием *хронологического метода* расчета системы. Проведено исследование, в результате которого была воспроизведена природно-климатическая обстановка в 22 н.п., расположенных на территории Республики *Якутия* и американского штата *Аляска*. Получены актинометрические и ветроэнергетические характеристики относительно каждого временного интервала с последующей их автоматической обработкой, визуализацией, анализом и выводами. Все исследования проводились на ПВК *«Локальный анализ параметров окружающей среды и солнечной радиации»*, реализованном на высокоуровневом языке программирования *Matlab*. Полученные *итоговые многолетние массивы параметров окружающей среды* планируется использовать в дальнейших исследованиях оптимизационно-прикладного характера, связанного с использованием ВИЭ и АБ в автономных энергетических комплексах. Использование таких массивов позволяет при достаточно детализированных моделях элементов системы производить оптимизационные исследования с применением *хронологического метода* расчета системы с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений на протяжении всего цикла расчетного периода.

В целом представленная в рамках данной статьи концепция будет развиваться, а также максимально интегрироваться в сопутствующие исследования системного характера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике: элементы теории, направления развития. – М.: Изд-во «Наука», 1983. – 447 с.
2. Блауберг И.В., Садовский В.Н., Юдин Э.Г. Системный подход в современной науке проблемы методологии системных исследований. – М.: Мысль, 1970. – 455 с.
3. Громыко Г.Л. Теория статистики. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 476 с.
4. Sapan Thapar, Seema Sharma, Ashu Verma. Economic and environmental effectiveness of renewable energy policy instruments: Best practices from India // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 66. – P. 487–498.
5. Pulak Mishra, Bhagirath Behera. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 56. – P. 953–964.
6. Dugoua E., Liu R., Urpelainen J. Geographic and socio-economic barriers to rural electrification: New evidence from Indian villages // Energy Policy. – 2017. – V. 106. – P. 278–287.
7. Ali M. Adil, Yekang Ko. Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 57. – P. 1025–1037.
8. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // Energy Conversion and Management. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
9. Воропай Н.И. Теория систем для электроэнергетиков. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 273 с.
10. Fang-Fang Li, Jun Qiu. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system // Applied Energy. – 2016. – V. 167. – P. 377–384.

11. Dynamic modeling of a hybrid wind/solar/hydro microgrid in EMTP/ATP / Lin Ye, Hai Bo Sun, Xu Ri Song, Li Cheng Li // Renewable Energy. – 2012. – V. 39. – P. 96–106.
12. Wagemann B., Manetsgruber D. Risk Management for Mini-grid Deployment in Rural Areas // Energy Procedia. – 2016. – V. 103. – P. 106–110.
13. Xuan Liu, Ye Hu, Yan Xiao. Risk management for rural energy industry of Sichuan Province in China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 69. – P. 1029–1044.
14. Role of smart grid in renewable energy: an overview / M.S. Hossain, N.A. Madlool, N.A. Rahim, J. Selvaraj, A.K. Pandey, A.F. Khan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 60. – P. 1168–1184.
15. Sunanda Sinha, S.S. Chandel. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 50. – P. 755–769.
16. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang // Applied Energy. – 2010. – V. 87. – P. 380–389.
17. Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment // Solar Energy. – 2006. – V. 80. – P. 578–588.
18. International Renewable Energy Agency (IRENA). Remap 2030. A renewable energy roadmap. URL: http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/REmap.pdf (дата обращения: 25.05.2017).
19. Прогноз экспертов Greenpeace о ВИЭ к 2030 году. URL: http://www.greenpeace.org/russia/ru/campaigns/nuclear/accidents/chernobyl/25yrs/renewable-energy/ (дата обращения: 25.05.2017).
20. Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (дата обращения: 25.05.2017).
21. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. URL: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf (дата обращения: 25.05.2017).
22. The Paris Agreement A new framework for global climate action. URL: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI (2016)573910_EN.pdf (дата обращения: 25.05.2017).
23. Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market // Renewable Energy. – 2016. – V. 91. – P. 53–63.
24. Law of the Republic of Belarus – about renewable energy (December 27, 2010. N 204-З) URL: http://cis-legislation.com/document.fwx? rgn=32614 (дата обращения: 25.05.2017).
25. Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 58. – P. 87–106.
26. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.Sh. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States // Energy Policy. – 2016. – V. 98. – P. 653–662.
27. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh / S. Mollik, M.M. Rashid, M. Hasanuzzaman, M.E. Karim, M. Hosenuzzaman // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 65. – P. 553–567.
28. Renewable energy development in rural areas of Iran / N. Afsharzade, A. Papzan, M. Ashjaee, S. Delangizan, S. Van Passel, H. Azadi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 65. – P. 743–755.
29. Akpan U., Essien M., Isihak S. The impact of rural electrification on rural micro-enterprises in Niger Delta, Nigeria // Energy for Sustainable Development. – 2013. – V. 17. – P. 504–509.
30. Van Gevelt T. Rural electrification and development in South Korea // Energy for Sustainable Development. – 2014. – V. 23. – P. 179–187.
31. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review / N.J. Williams, P. Jaramillo, J. Taneja, T.S. Ustun // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1268–1281.
32. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – Т. 104. – № 9. – С. 133–140.
33. Карамов Д.Н. Влияние объектов агропромышленного комплекса, на результат комплексной оптимизации децентрализованных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – № 8. – С. 107–112.
34. Саврасов Ф.В., Лукутин Б.В. Расчёт эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 6. – С. 17–21.
35. Оценка целесообразности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения удаленных потребителей в климатических условиях Севера Российской Федерации / М.А. Сурков, С.Г. Обухов, И.А. Плотников, Л.П. Сумарокова, М.М. Попов, С.А. Байдали // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – № 4. – С. 1–13. URL: https://naukovedenie.ru/PDF/97TVN416.pdf (дата обращения: 25.05.2017)
36. Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review / S. Mandelli, J. Barbieri, R. Mereu, E. Colombo // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 58. – P. 1621–1646.
37. «РАО ЕЭС Востока». URL: http://www.rao-esv.ru/map (дата обращения: 25.05.2017).
38. Лукутин Б.В., Лукутин О.Б., Шандарова Е.Б. Энергоэффективные системы генерирования электроэнергии для автономных ветроэлектростанций // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 203–206.
39. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.
40. Применение буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.А. Шутов, З.П. Хошнау // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 24–29.
41. Dursun E., Kilic O. Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – V. 34. – P. 81–89.
42. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm // Solar Energy. – 2013. – V. 97. – P. 460–473.
43. Glavin M.E., Hurley W.G. Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system // Solar Energy. – 2012. – V. 86. – P. 3009–3020.
44. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications / D. Tsuanyo, Y. Azoumah, D. Aussel, P. Neveu // Energy. – 2015. – V. 86. – P. 152–163.

45. Optimization of a Multi-Source System with Renewable Energy Based on Ontology / D. Saba, F.Z. Laallam, A.E. Hadidi, B. Berbaoui // Energy Procedia. – 2015. – V. 74. – P. 608–615.
46. Chang K.-H., Lin G. Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2015. – V. 52. – P. 40–51.
47. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 119. – P. 279–288.
48. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil / C.E.C. Nogueira, M.L. Vidotto, R.K. Niedzialkoski, S.N.M. de Souza, L.I. Chaves, T. Edwiges, D.B. dos Santos, I. Werncke // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
49. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO_2 Emissions / B.O. Bilal, V. Sambou, C.M.F. Kebe, P.A. Ndiaye, M. Ndongo // Energy Procedia. – 2014. – V. 195. – P. 1636–1647.
50. Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia / E.M.A. Mokheimer, A.Z. Sahin, A. Al-Sharafi, A.I. Ali // Energy Conversion and Management. – 2013. – V. 75. – P. 86–97.
51. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas // Energy Procedia. – 2012. – V. 20. – P. 258–270.
52. Fathima A.H., Palanisamy K. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1391–1404.
53. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems / J. Allegrini, K. Orehounig, G. Mavromatidis, F. Ruesch, V. Dorer, R. Evins // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1391–1404.
54. Mahesh A., Sandhu K.S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1135–1147.
55. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system / A. González, J.-R. Riba, A. Rius, R. Puig // Applied Energy. – 2015. – V. 154. – P. 752–762.
56. Optimal design of an autonomous solar–wind-pumped storage power supply system / Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, Jinqing Peng // Applied Energy. – 2015. – V. 160. – P. 728–736.
57. Optimal Sizing Design and Energy Management of Stand-alone Photovoltaic/Wind Generator Systems / I. Tégani, A. Aboubou, M.Y. Ayad, M. Becherif, R. Saadi, O. Kraa // Energy Procedia. – 2014. – V. 50. – P. 163–170.
58. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations // Energy Procedia. – 2011. – V. 6. – P. 666–677.
59. Kumar R., Gupta R.A., Bansal A.K. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm // Swarm and Evolutionary Computation. – 2013. – V. 8. – P. 33–43.
60. Maleki A., Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms // Solar Energy. – 2015. – V. 115. – P. 471–483.
61. Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico / V.M. Sanchez, A.U. Chavez-Ramirez, S.M. Duron-Torres, J. Hernandez, L.G. Arriaga, J.M. Ramirez // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – V. 39. – P. 16646–16655.
62. RP5.ru – Reliable Prognosis. URL: http://rp5.ru (дата обращения: 25.05.2017).
63. NASA SSE. URL: https://eosweb.larc.nasa.gov/ (дата обращения: 25.05.2017).
64. National Renewable Energy Laboratory, Solar and Wind Energy Resource Assessment (NREL-SWERA). URL: https://maps.nrel.gov/swera/ (дата обращения: 25.05.2017).
65. Rajbongshi R., Borgohain D., Mahapatra S. Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER // Energy. – 2017. – V. 126. – P. 461–474.
66. Kolhe M.L., Iromi Udumbara Ranaweera K.M., Sisara Gunawardana A.G.B. Techno-economic sizing of off-grid hybrid renewable energy system for rural electrification in Sri Lanka // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2015. – V. 11. – P. 53–64.
67. Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of Nigeria / L. Olatomiwa, S. Mekhilef, A.S.N. Huda, O.S. Ohunakin // Renewable Energy. – 2015. – V. 83. – P. 435–446.
68. Lawder M.T., Viswanathan V., Subramanian V.R. Balancing autonomy and utilization of solar power and battery storage for demand based microgrids // Journal of Power Sources. – 2015. – V. 279. – P. 645–655.
69. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions / S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche // Applied Energy. – 2008. – V. 85. – P. 968–987.
70. A Computer Program Development for Sizing Stand-alone Photovoltaic-Wind Hybrid Systems / H. Belmili, M.F. Almi, B. Bendi, S. Bolouma // Energy Procedia. – 2013. – V. 36. – P. 546–557.
71. Ershad A.M., Brecha R.J., Hallinan K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan // Renewable Energy. – 2016. – V. 85. – P. 445–453.
72. Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands / P. Blechinger, C. Cader, P. Bertheau, H. Huyskens, R. Seguin, C. Breye // Energy Policy. – 2016. – V. 98. – P. 674–687.
73. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology // Applied Energy. – 2008. – V. 85. – P. 1086–1101.
74. Banu Yetkin Ekren, Orhan Ekren. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions // Applied Energy. – 2009. – V. 86. – P. 1387–1394.
75. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing // Applied Energy. – 2010. – V. 87. – P. 592–598.
76. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia // Renewable Energy. – 2004. – V. 29. – P. 1793–1809.
77. Wind potential assessment of Quebec Province / A. Ilinca, E. McCarthy, J.-L. Chaumel, J.-L. Rétiveau // Renewable Energy. – 2003. – V. 28. – P. 1881–1897.
78. Feili H.R., Moghadasi F., Naderipour P. Optimization of Solar Cooling Systems with Simulation Modeling // Journal of mathematics and computer Science. – 2013. – V. 6. – P. 286–291.
79. Transient System Simulation Tool – «TRNSYS». URL: http://www.trnsys.com/ (дата обращения: 25.05.2017).
80. Sigarchian S.G., Malmquist A., Fransson T. Modeling and Control Strategy of a Hybrid PV/Wind/Engine/Battery System to Provide Electricity and Drinkable Water for Remote Applications // Energy Procedia. – 2014. – V. 57. – P. 1401–1410.
81. Sizing and maintenance visits optimization of a hybrid photovoltaic-hydrogen stand-alone facility using evolutionary algorithms /

S. Jiménez-Fernández, S. Salcedo-Sanz, D. Gallo-Marazuela, G. Gómez-Prada, J. Maellas, A. Portilla-Figueras // Renewable Energy. – 2014. – V. 66. – P. 402–413.
82. OpenFOAM. URL: http://www.openfoam.com/ (дата обращения: 25.05.2017).
83. Fluent. URL: https://www.sharcnet.ca/ (дата обращения: 25.05.2017).
84. GetHub. URL: https://github.com/ (дата обращения: 25.05.2017).
85. Lamigueiro O.P. SolaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R // Journal of Statistical Software. – 2012. – V. 50. – P. 1–32.
86. Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills // Solar energy. – 1969. – V. 12. – P. 333–346.
87. Schulze R.E. A physically based method of estimating solar radiation from suncards // Agricultural Meteorology. – 1976. – V. 16. – P. 85–101.
88. Atwater M.A., Ball J.T. A surface solar radiation model for cloudy atmosphere // Monthly weather review. – 1980. – V. 109. – P. 878–888.
89. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов находящихся в открытом доступе // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28–38.
90. Bird R.E., Hulstrom R.L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces // SERI Technical Report. – 1981. – V. 69. – P. 642–761.
91. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model // Applied Energy. – 2001. – V. 69. – P. 191–224.
92. Haurwitz B. Insolation in relation to cloud type // Journal Meteorology. – 1948. – V. 5. – P. 110–113.
93. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud // Solar Energy. – 1980. – V. 24. – P. 177–189.
94. Rasit Ata. Artificial neural networks applications in wind energy systems: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 49. – P. 534–562.
95. Ramasamy P., Chandel S.S., Yadav A.K. Wind speed prediction in the mountainous region of India using an artificial neural network model // Renewable Energy. – 2015. – V. 80. – P. 338–347.
96. Alaska Energy Authority. Renewable energy atlas of Alaska. A guide to Alaska's clean, local and inexhaustible energy sources // REAP: Renewable Energy Alaska Project. URL: http://www.akenergyauthority.org/Portals/0/Publications/2015HighRes.pdf?ver=2016-04-21-120237-447 (дата обращения: 25.05.2017).
97. Typical meteorological year. Hourly solar radiation surface meteorological observations. User manual TD-9734. – Ashville, North Carolina: National climatic center, 1981. – 26 p.
98. TRNSYS Frequently Asked Questions. URL: http://sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/standard_tmy.htm (дата обращения: 25.05.2017).
99. A review of optimum sizing of hybrid PV–Wind renewable energy systems in Oman / A.S. Al Busaidi, H.A. Kazem, A.H. Al-Badi, M.F. Khan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 53. – P. 185–193.

Поступила 21.09.2017 г.

Информация об авторах

Карамов Д.Н., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок № 71 отдела теплосиловых систем № 70 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры электроснабжения и электротехники Энергетического института Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 620.9

FORMATION OF INITIAL METEOROLOGICAL ARRAYS USING LONG-TERM SERIES FM 12 SYNOP AND METAR IN SYSTEM ENERGY STUDIES

Dmitriy N. Karamov[1,2],
dmitriy.karamov@mail.ru

[1] Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov street, 664033, Irkutsk, Russia.

[2] Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the work is caused by the lack of a unified concept of taking into account the natural and climatic conditions in system studies in the energy sector.
The main aim *of the study is to demonstrate the possibility of using long-term meteorological observation data with international codes FM 12 Synop and METAR recorded at the nearest meteorological station from the object under consideration to reproduce the natural-climatic situation with a fixed estimated step throughout the entire cycle of the settlement period; to show the significance of long-term meteorological observation data in solving the global problem of optimizing the composition of autonomous energy complexes using renewable sources and energy storage applying the chronological method of calculating the system.*
The methods. *The concept introduced is consistently built on the fundamental provisions of the theory of system and interdisciplinary research with reference to the proven mathematical models that allow both processing and simulating natural climatic indices with a fixed discrete step. The work uses multi-year meteorological series with international codes FM 12 Synop and METAR, recorded at various weather stations in the Republic of Yakutia and the state of Alaska. A high-level Matlab programming language is used.*
The results. *The author has proposed a unified concept for reproduction of actinometrical and wind power indices, as well as many other natural and climatic parameters, having a direct connection with systemic tasks in the energy sector. This concept is implemented in the software and computing complex «Local analysis of environmental parameters and solar radiation» using a high-level programming language Matlab. The paper introduces the results of processing multi-year arrays of environmental parameters for 22 settlements located in various natural and climatic zones of the Republic of Yakutia and the American state of Alaska. The author carried out the detailed analysis of the results obtained with relevant conclusions and conclusions on the degree of their reliability and the possibility of using autonomous energy complexes with renewable sources and energy storage in the optimization studies applying the chronological method of calculating the system.*

Key words:
Renewable energy sources, solar radiation, wind energy potential, meteorological series, system research, optimization power of equipment, chronological method.

REFERENCES

1. Melentiev L.A. *Systemnye issledovaniya v energetike: element teorii, napravleniya razvitiya* [System research in power engineering: elements of theory, directions of development]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 447 p.
2. Blauberg I.V., Sadovsky V.N., Yudin E.G. *Systemny podkhod v sovremennoy nauke problem metodologii sistemnykh issledovany* [System approach in modern science problems of the methodology of system studies]. Moscow, Mysl Publ., 1970. 455 p.
3. Gromyko G.L. *Teoriya statistiki* [Theory of statistics]. Moscow, INFRA-M Publ., 2006. 476 p.
4. Sapan Thapar, Seema Sharma, Ashu Verma. Economic and environmental effectiveness of renewable energy policy instruments: Best practices from India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 66, pp. 487–498.
5. Pulak Mishra, Bhagirath Behera. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 56, pp. 953–964.
6. Dugoua E., Liu R., Urpelainen J. Geographic and socio-economic barriers to rural electrification: New evidence from Indian villages. *Energy Policy*, 2017, vol. 106, pp. 278–287.
7. Ali M. Adil, Yekang Ko. Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 57, pp. 1025–1037.
8. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic–diesel–battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
9. Voropai N.I. *Teoriya system dlya elektroenergetikov* [Theory of systems for electric power industry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 273 p.
10. Fang-Fang Li, Jun Qiu. Multi-objective optimization for integrated hydro–photovoltaic power system. *Applied Energy*, 2016, vol. 167, pp. 377–384.
11. Lin Ye, Hai Bo Sun, Xu Ri Song, Li Cheng Li. Dynamic modeling of a hybrid wind/solar/hydro microgrid in EMTP/ATP. *Renewable Energy*, 2012, vol. 39, pp. 96–106.
12. Wagemann B., Manetsgruber D. Risk Management for Mini-grid Deployment in Rural Areas. *Energy Procedia*, 2016, vol. 103, pp. 106–110.
13. Xuan Liu, Ye Hu, Yan Xiao. Risk management for rural energy industry of Sichuan Province in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 69, pp. 1029–1044.
14. Hossain M.S., Madlool N.A., Rahim N.A., Selvaraj J., Pandey A.K., Khan A.F. Role of smart grid in renewable energy: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1168–1184.
15. Sinha S., Chandel S.S. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 50, pp. 755–769.
16. Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 380–389.

17. Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, pp. 578–588.
18. *International Renewable Energy Agency (IRENA). Remap 2030. A renewable energy roadmap*. Available at: http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/REmap.pdf (accessed 25 May 2017).
19. *Forecast of experts of Greenpeace*. Available at: http://www.greenpeace.org/russia/ru/campaigns/nuclear/accidents/chernobyl/25yrs/renewable-energy/ (accessed 25 May 2017).
20. *Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (accessed 25 May 2017).
21. *Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change*. Available at: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf (accessed 25 May 2017).
22. *The Paris Agreement A new framework for global climate action*. Available at: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI (2016)573910_EN.pdf (accessed 25 May 2017).
23. Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market. *Renewable Energy*, 2016, vol. 91, pp. 53–63.
24. *Law of the Republic of Belarus – about renewable energy* (December 27, 2010. N 204-3). Available at: http://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=32614 (accessed 25 May 2017).
25. Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 87–106.
26. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
27. Mollik S., Rashid M.M., Hasanuzzaman M., Karim M.E., Hosenuzzaman M. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 553–567.
28. Afsharzade N., Papzan A., Ashjaee M., Delangizan S., Van Passel S., Azadi H. Renewable energy development in rural areas of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 743–755.
29. Akpan U., Essien M., Isihak S. The impact of rural electrification on rural micro-enterprises in Niger Delta, Nigeria. *Energy for Sustainable Development*, 2013, vol. 17, pp. 504–509.
30. Van Gevelt T. Rural electrification and development in South Korea. *Energy for Sustainable Development*, 2014, vol. 23, pp. 179–187.
31. Williams N.J., Jaramillo P., Taneja J., Ustun T.S. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1268–1281.
32. Karamov D.N. Mathematical modelling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 104, no. 9, pp. 133–140. In Rus.
33. Karamov D.N. The agro-industrial complex facilities influence on the result of the complex optimization of the decentralized power supply systems using renewable energy sources. The *Bulletin of Krasnoyarsk agrarian University*, 2015, no. 8, pp. 107–112. In Rus.
34. Savrasov F.V., Lukutin B.V. Calculation of the efficiency of the use of autonomous power supply systems with photoelectric stations in the conditions of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 6, pp. 17–21. In Rus.
35. Surkov M.A., Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Sumarokova L.P., Popov M.M., Baydali S.A. Feasibility assessment of photovoltaic plants for power supply of remote customers in the climatic conditions of Northern Russia. Naukovedenie, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 1–13. In Rus. Available at: https://naukovedenie.ru/PDF/97TVN416.pdf (accessed 25 May 2017).
36. Mandelli S., Barbieri J., Mereu R., Colombo E. Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 1621–1646.
37. *«RAO EES Vostoka»* [«RAO Energy Systems of the East»]. Available at: http://www.rao-esv.ru/map (accessed 25 May 2017).
38. Lukutin B.V., Lukutin O.B., Shandarova E.B. Energy-efficient power generation systems for autonomous wind stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 203–206. In Rus.
39. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. In Rus.
40. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shutov E.A., Khoshnau Z.P. Primenenie bufernykh nakopiteley energii dlya povysheniya energoeffektivnosti vetrodizelnykh elektrostantsii [Use of buffer storage for increasing energy efficiency wind-diesel power stations]. *Electricity*, 2012, no. 6, pp. 24–29.
41. Dursun E., Kilic O. Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, vol. 34, pp. 81–89.
42. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 2013, vol. 97, pp. 460–473.
43. Glavin M.E., Hurley W.G. Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system. *Solar Energy*, 2012, vol. 86, pp. 3009–3020.
44. Tsuanyo D., Azoumah Y., Aussel D., Neveu P. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications. *Energy*, 2015, vol. 86, pp. 152–163.
45. Saba D., Laallam F.Z., Hadidi A.E., Berbaoui B. Optimization of a Multi-Source System with Renewable Energy Based on Ontology. *Energy Procedia*, 2015, vol. 74, pp. 608–615.
46. Chang K.-H., Lin G. Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, vol. 52, pp. 40–51.
47. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic–diesel–battery stand-alone systems minimizing system weight. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 119, pp. 279–288.
48. Nogueira C.E.C., Vidotto M.L., Niedzialkoski R.K., De Souza S.N.M., Chaves L.I., Edwiges T., Dos Santos D.B., Werncke I. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
49. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., Ndiaye P.A., Ndongo M. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO_2 Emissions. *Energy Procedia*, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
50. Mokheimer E.M.A., Sahin A.Z., Al-Sharafi A., Ali A.I. Modeling and optimization of hybrid wind–solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 75, pp. 86–97.
51. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, pp. 258–270.

52. Fathima A.H., Palanisamy K. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1391–1404.
53. Allegrini J., Orehounig K., Mavromatidis G., Ruesch F., Dorer V., Evins R. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1391–1404.
54. Mahesh A., Sandhu K.S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1135–1147.
55. González A., Riba J.-R., Rius A., Puig R. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system. *Applied Energy*, 2015, vol. 154, pp. 752–762.
56. Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, Jinqing Peng. Optimal design of an autonomous solar-wind-pumped storage power supply system. *Applied Energy*, 2015, vol. 160, pp. 728–736.
57. Tégani I., Aboubou A., Ayad M.Y., Becherif M., Saadi R., Kraa O. Optimal Sizing Design and Energy Management of Stand-alone Photovoltaic/Wind Generator Systems. *Energy Procedia*, 2014, vol. 50, pp. 163–170.
58. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations. *Energy Procedia*, 2011, vol. 6, pp. 666–677.
59. Kumar R., Gupta R.A., Bansal A.K. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2013, vol. 8, pp. 33–43.
60. Maleki A., Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*, 2015, vol. 115, pp. 471–483.
61. Sanchez V.M., Chavez-Ramirez A.U., Duron-Torres S.M., Hernandez J., Arriaga L.G., Ramirez J.M. Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, pp. 16646–16655.
62. *RP5.ru – Reliable Prognosis*. Available at: http://rp5.ru (accessed 25 May 2017).
63. *NASA SSE*. Available at: https://eosweb.larc.nasa.gov/ (accessed 25 May 2017).
64. *National Renewable Energy Laboratory, Solar and Wind Energy Resource Assessment (NREL·SWERA)*. Available at: https://maps.nrel.gov/swera/ (accessed 25 May 2017).
65. Rajbongshi R., Borgohain D., Mahapatra S. Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER. *Energy*, 2017, vol. 126, pp. 461–474.
66. Kolhe M.L., Ranaweera K.M.I.U., Sisara Gunawardana A.G.B. Techno-economic sizing of off-grid hybrid renewable energy system for rural electrification in Sri Lanka. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2015, vol. 11, pp. 53–64.
67. Olatomiwa L., Mekhilef S., Huda A.S.N., Ohunakin O.S. Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of Nigeria. *Renewable Energy*, 2015, vol. 83, pp. 435–446.
68. Lawder M.T., Viswanathan V., Subramanian V.R. Balancing autonomy and utilization of solar power and battery storage for demand based microgrids. *Journal of Power Sources*, 2015, vol. 279, pp. 645–655.
69. Diaf S., Notton G., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. *Applied Energy*, 2008, vol. 85, pp. 968–987.
70. Belmili H., Almi M.F., Bendi B., Bolouma S. A Computer Program Development for Sizing Stand-alone Photovoltaic-Wind Hybrid Systems. *Energy Procedia*, 2013, vol. 36, pp. 546–557.
71. Ershad A.M., Brecha R.J., Hallinan K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan. *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, pp. 445–453.
72. Blechinger P., Cader C., Bertheau P., Huyskens H., Seguin R., Breye C. Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 674–687.
73. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. *Applied Energy*, 2008, vol. 85, pp. 1086–1101.
74. Ekren B.Y., Ekren O. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 1387–1394.
75. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 592–598.
76. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia. *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1793–1809.
77. Ilinca A., McCarthy E., Chaumel J.-L., Rétiveau J.-L. Wind potential assessment of Quebec Province. *Renewable Energy*, 2003, vol. 28, pp. 1881–1897.
78. Feili H.R., Moghadasi F., Naderipour P. Optimization of Solar Cooling Systems with Simulation Modeling. *Journal of mathematics and computer Science*, 2013, vol. 6, pp. 286–291.
79. *Transient System Simulation Tool – «TRNSYS»*. Available at: http://www.trnsys.com/ (accessed 25 May 2017).
80. Sigarchian S.G., Malmquist A., Fransson T. Modeling and Control Strategy of a Hybrid PV/Wind/Engine/Battery System to Provide Electricity and Drinkable Water for Remote Applications. *Energy Procedia*, 2014, vol. 57, pp. 1401–1410.
81. Jiménez-Fernández S., Salcedo-Sanz S., Gallo-Marazuela D., Gómez-Prada G., Maellas J., Portilla-Figueras A. Sizing and maintenance visits optimization of a hybrid photovoltaic-hydrogen stand-alone facility using evolutionary algorithms. *Renewable Energy*, 2014, vol. 66, pp. 402–413.
82. *OpenFOAM*. Available at: http://www.openfoam.com/ (accessed 25 May 2017).
83. *Fluent*. Available at: https://www.sharcnet.ca/ (accessed 25 May 2017).
84. *GetHub*. Available at: https://github.com/ (accessed 25 May 2017).
85. Lamigueiro O.P. SolaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R. *Journal of Statistical Software*, 2012, vol. 50, pp. 1–32.
86. Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 1969, vol. 12, pp. 333–346.
87. Schulze R.E. A physically based method of estimating solar radiation from suncards. *Agricultural Meteorology*, 1976, vol. 16, pp. 85–101.
88. Atwater M.A., Ball J.T. A surface solar radiation model for cloudy atmosphere. *Monthly weather review*, 1980, vol. 109, pp. 878–888.
89. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar radiation based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37. In Rus.
90. Bird R.E., Hulstrom R.L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. *SERI Technical Report*, 1981, vol. 69, pp. 642–761.
91. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model. *Applied Energy*, 2001, vol. 69, pp. 191–224.
92. Haurwitz B. Insolation in relation to cloud type. *Journal Meteorology*, 1948, vol. 5, pp. 110–113.
93. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 1980, vol. 24, pp. 177–189.

94. Ata R. Artificial neural networks applications in wind energy systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, pp. 534–562.
95. Ramasamy P., Chandel S.S., Yadav A.K. Wind speed prediction in the mountainous region of India using an artificial neural network model. *Renewable Energy*, 2015, vol. 80, pp. 338–347.
96. Alaska Energy Authority. Renewable energy atlas of Alaska. A guide to Alaska's clean, local and inexhaustible energy sources. REAP: Renewable Energy Alaska Project. URL: http://www.akenergyauthority.org/Portals/0/Publications/2015HighRes.pdf?ver=2016-04-21-120237-447 (accessed 25 May 2017).
97. *Typical meteorological year. Hourly solar radiation surface meteorological observations. User manual TD-9734*. Ashville, North Carolina, National climatic center, 1981. 26 p.
98. *TRNSYS Frequently Asked Questions*. Available at: http://sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/standard_tmy.htm (accessed 25 May 2017).
99. Al Busaidi A.S., Kazem H.A., Al-Badi A.H., Khan M.F. A review of optimum sizing of hybrid PV–Wind renewable energy systems in Oman. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 53, pp. 185–193.

Received: 21 September 2017.

Information about the authors

Dmitriy N. Karamov, Cand. Sc., researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; associate professor, Irkutsk National Research Technical University.