

УДК 551.501

ЭКСТРАПОЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ КАК ИСТОЧНИКОВ ЭЗЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Кубова Разия Махмудовна,

канд. физ.-мат. наук, доцент,

e-mail: rkubova@muiiv.ru,

Московский университет им. С.Ю. Вите, г. Москва, Россия,

Кубов Владимир Ильич,

канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра приборостроения,

e-mail: kvi@mksat.net,

Черноморский государственный университет им. П.Могилы, г. Николаев, Украина,

Боженко Анна Леонидовна,

ведущий специалист кафедры техногенной безопасности,

e-mail: voodoo_81@mail.ru,

Черноморский государственный университет им. П.Могилы, г. Николаев, Украина

Значительная часть возобновляемых источников энергии использует такие естественные природные ресурсы, как энергия солнечного излучения и ветра. При выборе мест размещения станций зеленой энергетики возникает необходимость в информации о пространственном и временном распределении ожидаемых энергетических характеристик в зависимости от географического расположения станции. Оценка потенциала солнечной и ветровой энергии производится по данным сети метеостанций, на которых проводятся регулярные актинометрические наблюдения. Поскольку пространство, не охваченное сетью метеостанций, в некоторых регионах достигает до 1000 км, существует необходимость интерполировать или экстраполировать имеющиеся данные на требуемые географические области. В статье по результатам комплексных измерений тока солнечных фотоэлектрических батарей и скорости ветра проводится анализ корреляционных характеристик поля среднесуточных значений солнечной освещенности и скорости ветра в сопоставлении с данными международного архива данных PV-GIS за период с 2007 по 2016 гг. Рассматриваются вариации по долготе и по широте. Полученные данные могут быть использованы как для целей пространственной экстраполяции количественных характеристик источников «зеленой» энергии, так и для оценок надежности сети из таких отдельных источников.

Ключевые слова: зеленая энергетика, солнечная освещенность, температура, скорость ветра, пространственная корреляция

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF INSOLATION, WIND SPEED AND TEMPERATURE BY THE INTERNATIONAL MODEL PV-GIS

Kubova R.M.,

candidate of physico-mathematical sciences, Associate Professor,

e-mail: rkubova@muiiv.ru,

Moscow Witte University,

Kubov V.I.,

candidate of physico-mathematical sciences, Associate Professor, Department of Instrument-Making

e-mail: kvi@mksat.net,

Petro Mohyla Black Sea State University named after Petra Mohyly,

Bozhenko A.L.,

leading specialist at the department of technological safety,

e-mail: voodoo_81@mail.ru,

Petro Mohyla Black Sea State University named after Petra Mohyly

Considerable part of renewable sources of energy based on such natural natural resources as energy of sunlight and wind. At the choice of locations of stations of green power there is a need for information on spatial and temporary distribution of the expected power characteristics depending on a geographical arrangement of the station. Assessment of potential of solar and wind energy is made by measurements on network of meteorological stations on which regular observations are made. As the space which isn't captured by network of meteorological stations in some regions reaches up to 1000 km, there is a need to interpolate or extrapolate the available data to the required geographical areas. In the article on the base of results of complex measurements of current of solar photo-electric batteries and speed of wind the analysis of correlation characteristics of the field of average daily values of solar illumination and speed of wind in comparison to data of the international data archive of PV-GIS from 2007 for 2016 is carried out. Variations on longitude and on width are considered. The obtained data can be used for spatial extrapolation of quantitative characteristics of sources of "green" energy, and for estimates of reliability of network from such separate sources.

Keywords: solar illumination, temperature, wind speed, spatial correlation

DOI 10.21777/2500-2112-2018-3-56-62

В связи с тем, что расширяется строительство и использование возобновляемых источников энергии, особое значение получают исследования, рассматривающие эффективность работы установок, использующих природные ресурсы, ресурсы «зеленой энергетики». Значительная роль среди таких установок принадлежит фотоэлектрическим станциям, использующим поток энергии солнца, и ветровым установкам. В свою очередь, энергия потока солнечного излучения, ветровые и тепловые энергетические характеристики зависят от места расположения станции и времени снятия характеристик в суточном и сезонном цикле. Для принятия решения о размещении установок зеленой энергетики необходима информация о пространственном и временном распределении ожидаемых энергетических характеристик. Оценка потенциала солнечной и ветровой энергии производится по данным сети метеостанций, созданной в СССР, на которых проводились регулярные актинометрические наблюдения. К настоящему времени на территории России количество станций, на которых ведутся измерения, составляет менее 130, среднее расстояние между ними около 500 км, а в менее населенных районах до 1000 км [5]. Имеющиеся измерения характеристик, полученных от естественных природных источников в различных гелио-геофизических условиях, должны служить обоснованием для планирования размещения станций зеленой энергетики. Кроме того, необходимо учитывать пространственную и временную структуру вариаций используемых энергетических характеристик. Поскольку имеющиеся экспериментальные данные охвачены довольно редкой сетью актинометрических и метеорологических станций, необходимо эти данные интерполировать или экстраполировать на требуемые географические условия. При анализе энергетического потенциала конкретного региона большое значение имеют результаты актинометрических наблюдений, полученные в данном географическом регионе.

Непосредственные регулярные измерения тока солнечных электрических батарей, скорости ветра, а также температуры окружающей среды организованы в национальном университете имени Петра Могилы, расположенном на юге Украины в г. Николаеве. Полученные авторами статьи результаты наблюдений, проводимых с 2012 года по настоящее время, позволили определить вариации энергетических характеристик для установок солнечной и ветро-энергетики [1, 2, 4, 6]. Полученные результаты можно использовать для планирования размещения установок зеленой энергетики в регионе, в котором проводились измерения – на юге Украины, а также вдоль северного побережья Черного моря. Чтобы определить более определенно, на какую пространственную область можно распространить полученные оценки, необходимо сравнить их с результатами, полученными в географически удаленных регионах и проанализировать их корреляционные характеристики.

Для пространственной оценки солнечных ресурсов и работы фотоэлектрических установок можно использовать информационную систему географического распределения фотоэлектрических данных PV-GIS (Photovoltaic geographical information system). Разработчиком этой системы является Объединенный научно-исследовательский центр Энергоэффективности возобновляемых источни-

ков энергии Европейской комиссии (European Commission, Joint Research Centre Energy Efficiency and Renewables Unit – JRC), который находится в г. Испре на севере Италии. В центре разработана методика расчета PV-GIS, в основу которой положена экстраполяция результатов актинометрических измерений по данным спутниковых снимков реального облачного покрова земли. На сайте центра JRC содержится онлайн-приложение PV-GIS, которое можно использовать для расчета потока солнечной радиации и скорости ветра по заданным координатам [5, 6].

Для обоснования использования имеющихся современных данных следует провести верификацию материалов измерений, методов экстраполяции и модельных расчетов ожидаемых энергетических характеристик. С этой целью было проведено сравнение рассчитанных по методу PV-GIS энергетических характеристик с полученными авторами локальными экспериментальными данными.

Результаты сопоставления экспериментальных значений фототока и расчеты по методике PV-GIS приведены на рисунке 1. По оси x приведены значения потока солнечной радиации в W/m^2 , рассчитанные по методу PV-GIS, оси y – экспериментальные значения фототока в mA . Также на рисунке 1 обозначена регрессионная зависимость между экспериментальными значениями фототока и значениями, полученными по методике PV-GIS за период с 2007 по 2016 гг. включительно. Эта зависимость аппроксимируется линейной функцией $y=0.0045x$, где y – значения фототока в mA , x – поток солнечной радиации в W/m^2 . Тесноту связи экспериментальных значений фототока с расчетными значениями характеризует коэффициент детерминации $R^2=0.91$. Такую высокую степень связи можно объяснить тем, что методика PV-GIS является некоторой экстраполяцией результатов актинометрических измерений по результатам спутниковых фотографий реальной облачности.

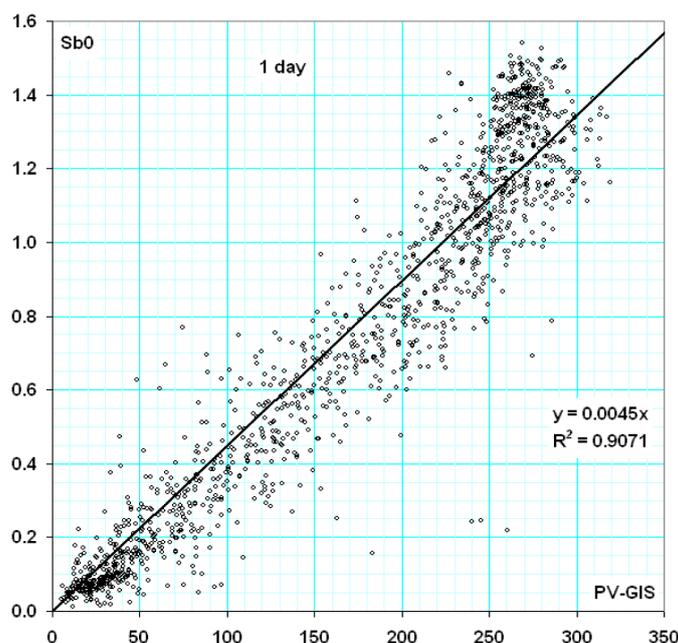


Рисунок 1 – Зависимость среднесуточного фототока от оценок в модели для г. Николаева 2012–2016 гг.

Приведенные результаты показывают, что метод PV-GIS дает высокую надежность для оценки освещенности в регионе г. Николаева, особенно, принимая во внимание тот факт, что в регионе не имеется специальных средств для актинометрических измерений, а ближайшая станция находится в Одессе на расстоянии около 110 км. Предполагая, что надежность оценок для других географических локаций в этой модели не будет хуже, чем для г. Николаева, авторами рассчитаны корреляционные соотношения значений мощности солнечных элементов для точек с разным удалением от г. Николаева в двух направлениях: западном и северном. Схема расположения направлений трасс проведенных расчетов показана на карте (рисунок 2).

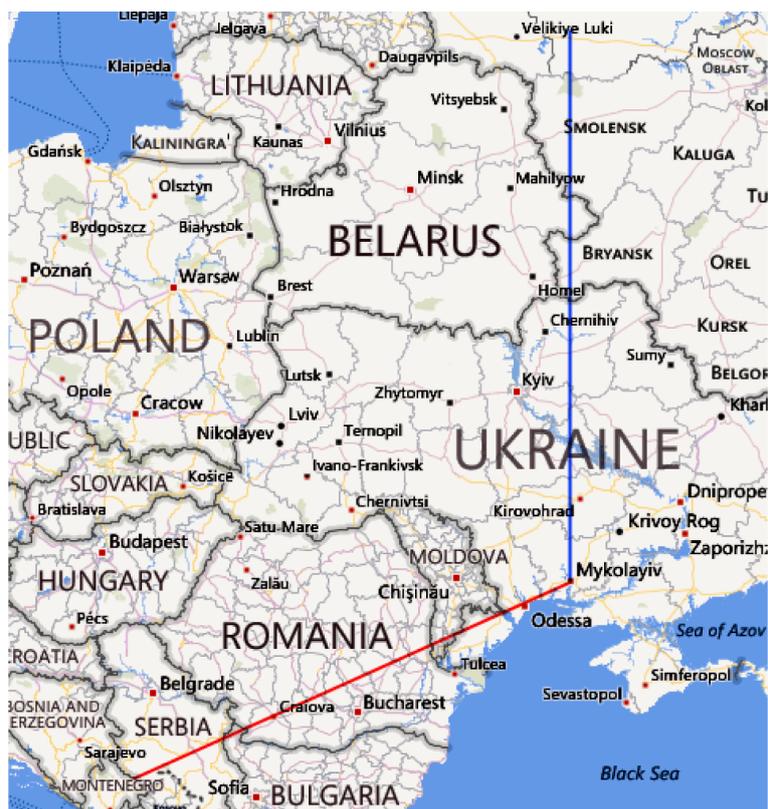


Рисунок 2 – Схема ориентации трасс расчета корреляции

Для вычисления корреляционных отношений из базы данных почасовых значений PV-GIS были выбраны значения мощности солнечных элементов для 10-летнего интервала. По этим данным рассчитывались среднесуточные значения. Вычисленные средние дневные значения сравнивались для разных точек трассы в зависимости от их взаимной удаленности.

В качестве характеристики степени связи определялся коэффициент детерминации R^2 через коэффициент корреляции для пар значений географических положений точки – г. Николаев и удаленная точка, т.е.:

$$R^2 = \rho^2,$$

где ρ – коэффициент корреляции.

Результаты регрессионного анализа представлены на рисунке 3. По оси x расположены отсчеты по дальности в км, по оси y – значения коэффициента детерминации R^2 . Красным цветом обозначены результаты по трассе в направлении на запад, синим цветом обозначено направление на север.

Зависимость значений коэффициентов детерминации от расстояния, рассчитанные аналогичным образом для скорости ветра, представлены на рисунке 4. Расчеты производились в зависимости от удаленности от города Николаева в долготном и широтном направлении. Красным цветом выделены данные в направлении удаления на запад, синим цветом обозначено направление на север. Точками обозначены значения коэффициента детерминации, полученные на данном расстоянии, сглаженной линией обозначены возможные аппроксимации изменения R^2 от расстояния.

Радиусы пространственной корреляции (по уровню $R^2=0.25$ или $\rho=0.5$) для солнечной освещенности составляет около 500 км в долготном направлении и около 700 км в широтном направлении. Радиусы пространственной корреляции скорости ветра составляет около 400 км в долготном направлении и около 1000 км в широтном направлении.

Результаты исследования сезонных взаимосвязей полей инсоляции и скорости ветра могут применяться для составления карты размещения установок зеленой энергетики. Сезонные колебания, как совокупность сезонных и квази-сезонных процессов проявляются в большинстве социально-экономических процессов [3], в том числе, в отраслях и сферах, связанных с энергетикой. Последствия таких

колебаний можно частично нивелировать, перераспределяя потребление энергии, получаемой от различных источников. Для России характерны существенные сезонные колебания спроса и потребления энергии, как в масштабах производства, так и в быту. По основным социально-экономическим показателям, в краткосрочной динамике которых присутствует сезонная составляющая, Россия входит в десятку стран с самой большой амплитудой колебаний, что выдвигает исследование сезонных вариаций в условиях изменяющегося климата в число актуальных и значимых.

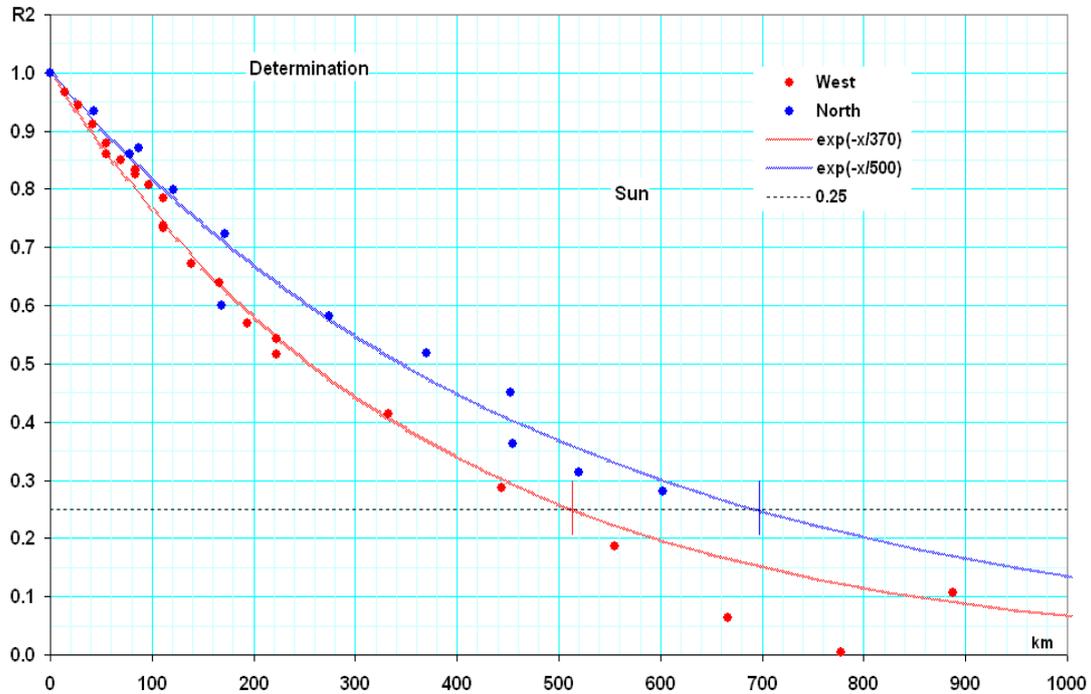


Рисунок 3 – Зависимости R^2 от расстояния (освещённость)

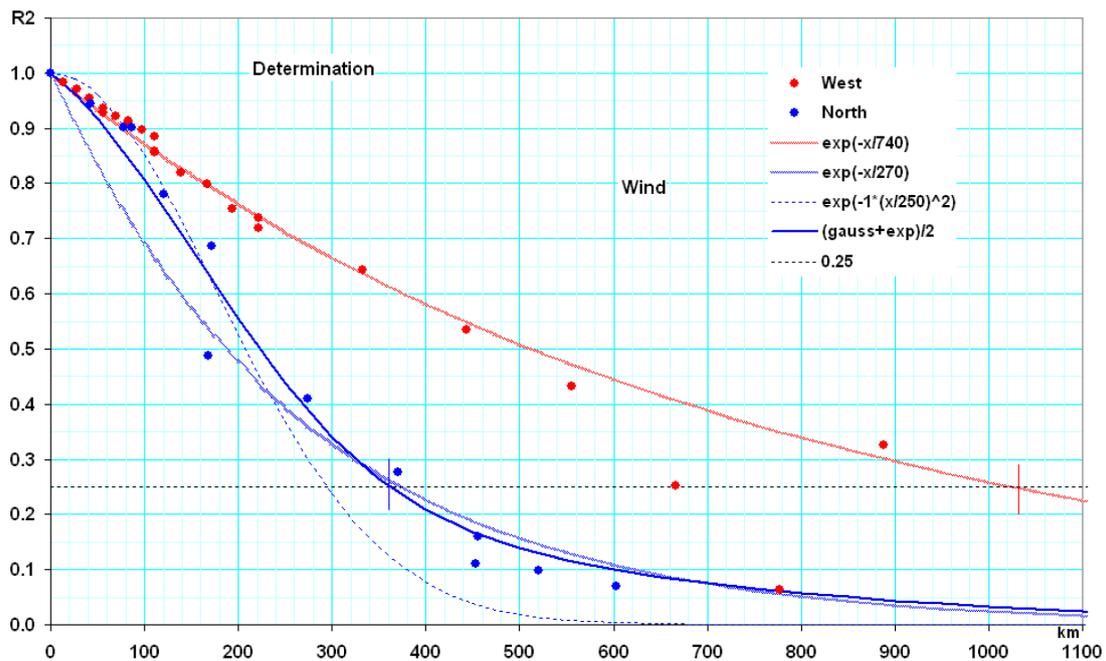


Рисунок 4 – Зависимости R^2 от расстояния (ветер)

Заключение

Результаты комплексных измерений тока солнечных батарей, скорости ветра и температуры окружающей среды, проведенные на юге Украины (г. Николаев), сопоставлены с оценками информационной системы географического распределения фотоэлектрических данных PV-GIS. Получена высокая степень соответствия рассмотренных характеристик с коэффициентом детерминации $R^2=0.91$, что свидетельствует об адекватности экспериментальных данных.

По базе данных почасовых значений PV-GIS на 10-летнем интервале вычислены средние дневные значения вдоль трассы, ориентированной по широте в западном направлении, и по долготе в северном направлении от точки измерений, что дает основание экстраполировать полученные данные на определенные области.

Радиусы пространственной корреляции среднесуточных значений солнечной освещенности и скорости ветра зависят от взаимной ориентации разнесенных географических точек, причем для ветра зависимость от ориентации значительно сильнее (400 км по долготе, 1000 км по широте), чем для освещенности (500 км по долготе, 700 км по широте). Учет полученных корреляционных значений может быть полезен при построении надежной сети из источников альтернативной энергии, не зависимой от погодных условий.

В связи с тем, что параметры внешней среды испытывают регулярные сезонные изменения, это следует учитывать при анализе на многолетних интервалах корреляционных характеристик связи этих параметров. При детальном анализе целесообразно рассматривать как корреляцию по усредненным сезонным изменениям, так и корреляцию по отклонениям от регулярного хода.

Исследование форм и степени сезонных взаимосвязей для определенного региона представляется актуальным, поскольку полученные результаты позволяют составить наиболее точный сезонный график по выработке энергии и перераспределению источников энергии.

Список литературы

1. Андреева, Н.Ю. Исследование вариаций солнечной радиации для оценки энергетической эффективности солнечных фотоэлектрических батарей / Н.Ю. Андреева, В.И. Кубов, Р.М. Кубова, Павленко А.А. // Наукові праці. т. 233, вип. 221. Техногенна безпека. Миколаїв: ЧДУ ім. П.Могили. – 2014. – С. 126–133.
2. Боженко, А.Л. Особенности представления измерений скорости ветра в городских условиях / А.Л. Боженко, Д.Д. Зюляев, В.И. Кубов, Р.М. Кубова // Образовательные ресурсы и технологии. – 2015. – № 1 (9). – С. 83–92.
3. Землянский Д.Ю. Концептуальные подходы к исследованию сезонной ритмики в территориальных социально-экономических системах // Методология и методика региональных исследований: из прошлого в будущее (к 190-летию со дня рождения Я.А. Соловьева). Мат-лы школы-семинара молодых ученых. – Смоленск: Универсум, 2010.
4. Кубова, Р.М. Исследование характеристик возобновляемых источников энергии с учетом климатических особенностей побережья Черного моря / Р.М. Кубова, В.И. Кубов, А.Л. Боженко, Д.Д. Зюляев, А.А. Павленко // Современные проблемы использования потенциала морских акваторий и прибрежных зон. Материалы XI Международной научной конференции. – М.: изд. МУ им. С.Ю. Витте, 2015. – С. 481–492.
5. Попель, О.С. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных): Учебное пособие / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева [и др.]. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 56 с.
6. Boshenko, A. Calculation of energy supply reliability under complex use of solar systems and wind turbines / A. Boshenko, V. Kubov, R. Kubova // Экологические и природоохранные проблемы современного общества и пути их решения: материалы XIII международной научной конференции; в 4-х ч. / под ред. А.В. Семенова, Н.Г. Малышева, Ю.С. Руденко. – М.: изд. МУ им. С.Ю. Витте, 2017. – Ч. 1. – С. 8–18.
7. Photovoltaic geographical information system. PV-GIS. – URL: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (дата обращения: 10.08.2018).
8. NREL's PVWatts Calculator. – URL: <http://pvwatts.nrel.gov/> (дата обращения: 10.08.2018).

References

1. *Andreeva, N.Yu.* Issledovanie variacij solnechnoj radiacii dlya ocenki ehnergeticheskoy ehffektivnosti solnechnyh fotoelektricheskikh batarej / N.Yu. Andreeva, V.I. Kubov, R.M. Kubova, A.A. Pavlenko // Naukovi praci. t. 233, vip. 221. Tekhnogenna bezpeka. Mikolaïv: CHDU im. P.Mogili. – 2014. – S. 126–133.
2. *Bozhenko, A.L.* Osobennosti predstavleniya izmerenij skorosti vetra v gorodskih usloviyah / A.L. Bozhenko, D.D. Zyulyaev, V.I. Kubov, R.M. Kubova // Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii. – 2015. – № 1 (9). – S. 83–92.
3. *Zemlyanskij D.Yu.* Konceptual'nye podhody k issledovaniyu sezonnoj ritmiki v territorial'nyh social'no-ehkonomicheskikh sistemah // Metodologiya i metodika regional'nyh issledovanij: iz proshlogo v budushchee (k 190-letiyu so dnya rozhdeniya Ya.A. Solov'eva). Mat-ly shkoly-seminara molodyh uchenyh. – Smolensk: Universum, 2010.
4. *Kubova, R.M.* Issledovanie harakteristik vozobnovlyaemyh istochnikov ehnergii s uchetom klimaticheskih osobennostej poberezh'ya Chernogo moraya / R.M. Kubova, V.I. Kubov, A.L. Bozhenko, D.D. Zyulyaev, A.A. Pavlenko // Sovremennye problemy ispol'zovaniya potenciala morskikh akvatorij i pribrezhnyh zon. Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. – M.: MU im. Vitte. 2015. – С. 481–492.
5. *Popel O.S.* Klimaticheskie dannye dlya vozobnovlyaemoj ehnergetiki Rossii (baza klimaticheskih dannyh): Uchebnoe posobie. – M.: Izd-vo MFTI, 2010. – 56 s.
6. *Boshenko, A.* Calculation of energy supply reliability under complex use of solar systems and wind turbines / A. Boshenko, V. Kubov, R. Kubova // Ehkologicheskije i prirodoohrannye problemy sovremennogo obshchestva i puti ih resheniya: materialy XIII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii; v 4-h ch. / pod red. A.V. Semenova, N.G. Malysheva, Yu.S. Rudenko. – M.: izd. MU im. S.Yu. Vitte, 2017. – CH. 1. – S. 8–18.
7. Photovoltaic geographical information system. PV-GIS. – URL: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (data obrashcheniya: 10.08.2018).
8. NREL's PVWatts Calculator. – URL: <http://pvwatts.nrel.gov/> (data obrashcheniya: 10.08.2018).