

Статические оценки климата и ГИС-технологий при анализе рисков в гелиоэнергетике

Static assessment of climate and GIS technologies in risk analysis in helio energy

Людмила Нефедова

Старший Научный Сотрудник Научно-Исследовательской Лаборатории Возобновляемых Источников Энергии Географического Ф-Та Мгу Имени М.в. Ломоносова, К. Г. Н.
E-Mail: Nefludmila@Mail.ru

Ludmila NEFEDOVA

PhD in Geography, Senior Researcher,
Research Laboratory of Renewable Energy Sources,
geographic faculty, Lomonosov MSU
nefludmila@mail.ru

Юлия Рафикова

Старший Научный Сотрудник Научно-Исследовательской Лаборатории Возобновляемых Источников Энергии Географического Ф-Та Мгу Имени М.в. Ломоносова, К. Г. Н.
E-Mail: Ju.raflkova@Gmail.com

Julia RAFIKOVA

PhD in Geography, Senior Researcher,
Research Laboratory of Renewable Energy Sources,
geographic faculty, Lomonosov MSU
ju.raflkova@gmail.com

Алтай

Источник: YuliyaKirayonakBO / Depositphotos.com



Аннотация. Рассмотрены проблемы размещения фотоэлектрических панелей для обеспечения наиболее стабильной выработки электроэнергии. Представлена методика оценки рисков нестабильности работы гелиоэнергетических станций на основе учета характеристик изменчивости поступления солнечной радиации с помощью применения ГИС-технологий. Для апробации данной методики выполнены расчеты внутригодового хода изменчивости статистических характеристик поступления суммарной солнечной радиации для ряда регионов России. Применение ГИС-технологий позволило оценить распределение характеристик изменчивости солнечной радиации по площади. В работе приведены результаты расчетов и построенных картосхем для Республики Алтай, где активно развивается последние годы солнечная энергетика. На данных территориях выделены зоны с наиболее низкими показателями изменчивости поступления солнечной радиации, где можно прогнозировать высокий уровень стабильности выработки электроэнергии на фотоэлектрических станциях. Проведено сопоставление с результатами использования установленной мощности на действующих СЭС.

Ключевые слова: ГИС-технологии, солнечная энергетика, риски, эффективность, выработка электроэнергии.

Abstract. The problems of optimizing the placement of photovoltaic panels to ensure the most stable power generation are considered. Methods for assessing the risks of instability in the operation of solar power plants based on taking into account the characteristics of the variability of the input of solar radiation using GIS technologies are presented. To test this technique, we calculated the intra-annual variation of the statistical characteristics of the total solar radiation input for a number of regions of Russia. The use of GIS technologies made it possible to assess the distribution of the characteristics of the variability of solar radiation over the area. This paper presents the results of calculations and constructed maps for Republic of Altai, where solar energy has been actively developing in recent years. In these territories, zones with the lowest indicators of variability in the input of solar radiation are identified and where a high level of stability of electricity generation at photovoltaic plants can be predicted.

Keywords: GIS technologies, solar energy, risks, efficiency, power generation.



Расширение использования ВИЭ требует тщательного изучения факторов риска, возникающих при создании и эксплуатации объектов энергетике

Введение

Последние 5 лет в России активизировался процесс использования возобновляемых источников энергии благодаря мерам, принимаемым правительством по поддержке сетевых объектов возобновляемой энергетики (ежегодные тендеры на строительство объектов возобновляемой энергетики до 2024 года, государственные обязательства по возврату инвестиций на 15-летний период, заключение договоров на поставку мощности и др.). В 2014 г. компанией «Хэвел» была введена в строй первая в России солнечная электростанция мощностью 5 МВт вблизи с. Кош-Агач в Республике Алтай. Первые две мощные сетевые ветроэлектростанции (ВЭС) в России были построены в Ульяновской области (80 МВт) в 2018 году. К августу 2020 года электростанции на ВИЭ работали в различных регионах России. Солнечные электростан-



Алтайский хребет

Источник: YURYTTARANIK / Depositphotos.com

ции (СЭС) – 1132,8 МВт, ВЭС – 538,7 МВт. Планируемый объем ввода по программе ВИЭ в России до 2024 г. составляет 5,4 ГВт, из них ВЭС – 3,4 ГВт, СЭС – 1,9 ГВт. В стране создано отечественное производство высокоэффективных солнечных панелей, работают предприятия по производству деталей ветроагрегатов.

Расширение использования возобновляемых источников энергии требует тщательного подхода и изучения факторов риска, возникающих при создании и эксплуатации объектов энергетики, а также определение основных методических подходов и этапов оценки видов и уровней риска. В развитии возобновляемой энергетики в России, как и во многих других странах мира, снижению рисков способствовали меры государственной поддержки этой отрасли. Оценка рисков является необходимым элементом при разработке любого проекта или долгосрочного плана в области возобновляемой энергетики в регионе. Для использования возобновляемых источников энергии в России чрезвычайно важна инвестиционная привлекательность проектов, а она обусловлена в энергетической сфере, как показывает международный опыт, степенью риска их реализации [1]. В значительной степени, природно-ресурсные риски работы фото-

электрических станций определяются изменчивостью поступления солнечной радиации и другими природно-климатическими особенностями территории размещения этих станций. Многофакторность оценок и расчетов рисков в гелиоэнергетике требуют применений методов многокритериального анализа. Во многих исследованиях метод многокритериального анализа решений на основе геоинформационных систем (GIS-MCDA) используется для создания карт, которые представляют потенциальные районы для солнечных электростанций в странах с различными климатическими условиями [2–5]. В настоящее время методы геоинформатики активно использу-

Объем ввода по программе ВИЭ в РФ до 2024 г. составит 5,4 ГВт, из них ВЭС – 3,4 ГВт, СЭС – 1,9 ГВт. В стране созданы отечественные производства солнечных панелей и деталей для ветроагрегатов

ются при изучении потенциала солнечной энергии и оценке рисков для различных территорий [6–9]. Геоинформационные системы (ГИС) позволяют решать следующие задачи:

- визуализация ресурсов для расчета производных величин (технический, экономический потенциал энергии);
- анализ территорий по уровню обеспеченности ресурсами и возможности размещения на них объектов солнечной энергетики применительно к разным масштабам территориальных исследований.

Результат таких исследований обычно представлен в виде интерактивных карт, ГИС и атласов, отображающих как исходные, так и производные величины, а также факторы, ограничивающие размещение объектов солнечной энергетики. Методоло-

прогноза выработки электроэнергии солнечными электростанциями.

Основные факторы риска использования солнечных энергетических систем в России

Разработка методологии анализа и управления рисками включает в себя, в первую очередь, необходимость предварительной оценки возможных рисков на всех этапах разработки проекта ВИЭ. Следует различать риски по этапам работы объектов возобновляемой энергетики: проектирование, строительство и эксплуатация. На фазе проектирования наибольшую опасность представляют риски, связанные с ошибками в оценке потенциала ресур-



Майминская солнечная электростанция,
Республика Алтай

Источник:
Starover64 / Depositphotos.com

гия все больше основывается на последовательном многокритериальном анализе. В разных странах были разработаны такие методы, как методика порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS), методика – исключение и выбор, выражающий реальность (ELECTRE) [10], метод упорядоченного взвешенного усреднения (OWA) [7, 11], улучшающие процесс анализа и обеспечивающие устранение субъективности при рассмотрении определенных факторов.

Цель данного исследования – предложить подход к оценке влияния изменчивости климатических факторов на риски

сов в районе создания объекта, ошибки в выборе участка размещения и ошибки в выборе оборудования. При подготовке технико-экономического обоснования и организации инвестиций наиболее значимыми являются стратегические, валютные и инвестиционные риски. Непосредственно во время строительства, а также на этапе эксплуатации преобладают технологические и технические, управленческие риски [12]. Именно поэтому необходимым условием для получения инвестиций на проект ВЭС и обеспечения страхования строительных работ и дальнейшей эксплуатации ветроэлектростанций (ВЭС) является прове-

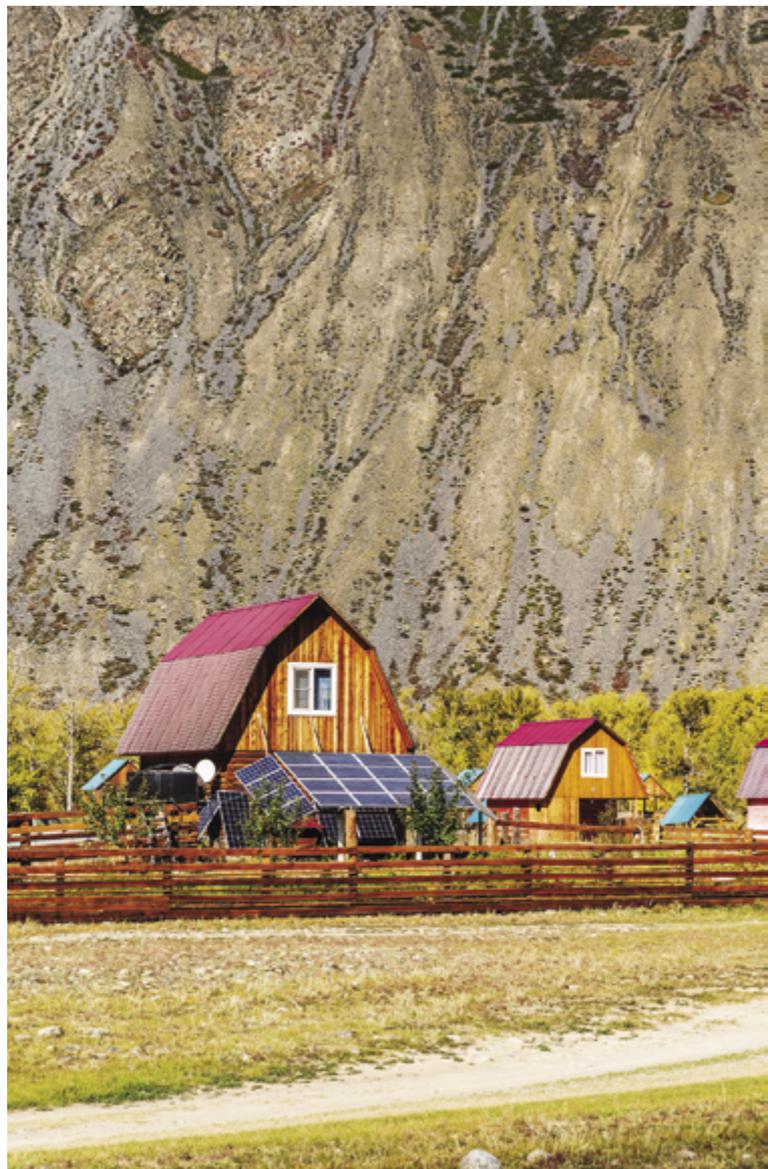
Ресурсные риски в России имеют особое значение, поскольку солнечная, ветровая и гидроэнергетика работают достаточно нестабильно из-за изменчивости климатических характеристик

дение длительного мониторинга (не менее года) за ветровым режимом на различной высоте по жестко определенной методике, обеспечивающей полный объем статистических данных о ветроэнергетических характеристиках. Гелиоэнергетика не требует проведения предпроектного мониторинга и позволяет проводить проектирование солнечных электростанций на основе международных баз данных, составленных по результатам ДДЗ и многолетних рядов актинометрических измерений.

На огромной территории России с большим разнообразием природных условий ресурсные риски имеют особое значение, поскольку используемые солнечные, ветровые и гидроэнергетические ресурсы подвержены значительной нестабильности во времени вследствие изменчивости климатических характеристик. Данная изменчивость обуславливает и значительные колебания объемов выработки электростанций, повышающие риски стабильной подачи ЭЭ в сеть и приводящие к рискам удорожания проектов при необходимости установки накопителей энергии. Необходимо отметить, что ресурсные и экологические риски имеют как внутреннюю, так и внешнюю составляющие. Риск дефицита необходимых ресурсов для обеспечения рентабельности проекта – обусловлен неравномерностью энергопотенциала ВИЭ во времени и пространстве. Однако, проведение дополнительных измерений, точный подбор параметров энергоустановок, позволяющих получить наиболее высокий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) – значительно снижают данный вид рисков. Природные и экологические риски связаны с возможностью катастрофических

явлений (ураганов, ливней, снегопадов, смерчей, землетрясений). К данному виду рисков относятся и возможные последствия для окружающей среды вследствие штатной работы или аварийных ситуаций на энергообъектах ВИЭ [13]. Для солнечных электростанций, и особенно сетевых, необходим расчет прогноза гарантированной выработки электроэнергии и выдачи мощности потребителю или в сеть. Снижение стоимости производства PV панелей говорит о предстоящем расширении использования солнечной энергии в ряде регионов России, в том числе использования на малых (в т. ч. фермерских и домашних) установках. Для выбора участков размещения СЭС и предпроектных оценок мощности необходимы данные не только о величине поступающей солнечной радиа-

Солнечные батареи во дворе лагеря в Чулышманской долине, Республика Алтай
Источник: Vadyuhin / Depositphotos.com



ции, но и о ее пространственно-временной изменчивости. Актинометрические данные показывают высокую временную изменчивость солнечных ресурсов в разных типах климата из-за большого разнообразия климатических условий и инсоляции на территории России. Такая изменчивость вызывает значительные колебания в выходной мощности электростанций, которые увеличивают риски стабильного обеспечения энергоэффективности в сети и приводят к опасностям повышения стоимости проекта, если необходимо установить устройства аккумуляции энергии. Это особенно важно для горных и малоизученных территорий, какой и является Республика Алтай. При расчетах необходимо учитывать и данные о распределении снеговых нагрузок как на дорожное покрытие, так и собственно на поверхности фотоэлектрических панелей в их наиболее неблагоприятных расчетных сочетаниях. Для прогнозов эффективности работы фотоэлектрических панелей важными характеристиками являются высота и продолжительность снежного покрова. Засыпание рабочей поверхности снегом приводит к значительному снижению расчетных значений мгновенного КПД модулей (более 35–40 %) [14–17].

Использованные данные и методология

Авторами были проведены оценки пространственно-временной изменчивости поступления суммарной солнечной радиации (S_r) на горизонтальную поверхность для ряда регионов России. Основой для проведения данных оценок послужили расчеты статистических характеристик падающей солнечной радиации по данным базы NASA SSE за десятилетний период (2009–2018 гг.) [18]. Массивы данных для проведения расчетов были сформированы из указанных исходных материалов с шагом сетки $0,5^\circ$. Для численной оценки изменчивости поступления прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность послужили расчеты коэффициента вариации (C_v). Оценивалась изменчивость среднемесячных и суточных значений. Значения коэффициента вариации месячных или среднемесячных суточных сумм радиации характеризуют межгодовую изменчивость, C_v суточных сумм – межсуточную. На основании полученных многолетних данных с использованием ГИС-техноло-

гий были созданы карто-схемы распределения среднемесячных значений C_v мес. за 10-летний период (2009–2018 гг.), а также данных о внутримесячной изменчивости путем расчетов C_v сут. за тот же период по месяцам для ряда регионов России с различными природно-климатическими условиями.

Обсуждение результатов

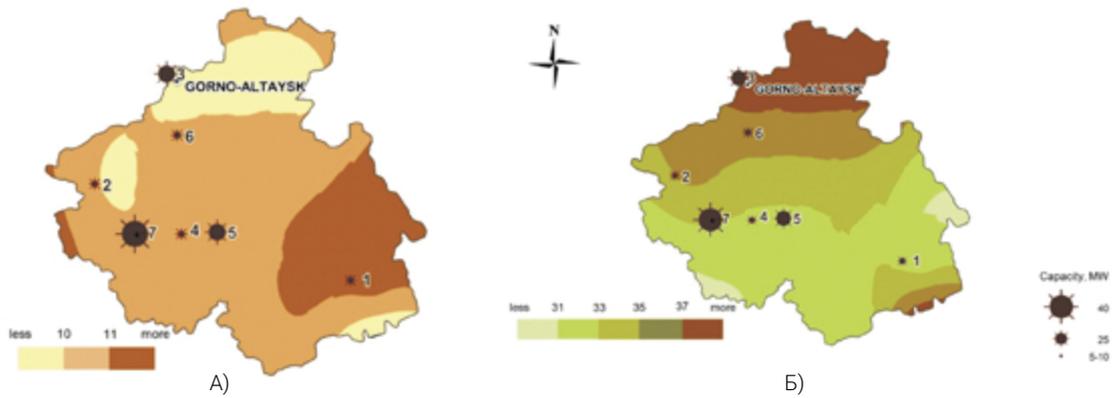
В данной статье представлены результаты проведения расчетов и оценок риска развития гелиоэнергетики в Республике Алтай – одной из горных территорий России, расположенной в южной части Си-



Юрта, использующая солнечные панели.
Алтайский хребет

Источник: *Snegolika / Depositphotos.com*

бири с большими различиями в рельефе и природно-климатических условиях, перспективной для развития туризма. В Республике Алтай остро стоит проблема необходимости обеспечения опережающего развития энергетической, инженерной, транспортной и придорожной инфраструктуры, управления отходами. До 2014 г. в республике не было собственного производства электроэнергии, кроме трех малых ГЭС и дизель-генераторов в отдаленных поселках. На территории и по настоящее время отсутствуют ЛЭП более 100кВ, вся электроэнергия поставлялась из граничных регионов России. Существующие низковольтные линии электропередач находятся в изношенном состоянии, что обу-



Солнечные электростанции:

1. Кош-Агачская, 2. Усть-Канская, 3. Майминская, 4. Онгудайская, 5. Ининская, 6. Чемальская, 7. Усть-Коксинская

Рис. 1. Карты-схемы распределения значений коэффициента вариации поступления прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность по данным базы NASA SSE за десятилетний период (2009–2018 гг.):

А) среднемесячных значений C_v мес., Б) среднегодовое значение C_v сут.

славливает высокие потери при передаче энергии. До 50 % населения имели ограниченный доступ к электроэнергии. К середине 2020 г. в республике Алтай работают восемь солнечных электростанций компании «Хевел» – совместного предприятия Группы компаний «Ренова» и АО «РОСНАНО» суммарной мощностью 120 МВт. Их расчетная годовая выработка электроэнергии – около 154 млн кВт·ч [19]. По оценкам компании, это позволит обеспечить более 30 % потребления электроэнергии региона и на треть сократить объем передачи электроэнергии из соседних регионов.

По результатам проведенных расчетов по базе данных NASA SSE построены карты распределения коэффициента вариации

прямой солнечной радиации среднемесячных значений и суточных значений по территории Республики Алтай. (рис. 1). Анализ совмещенных карт позволил выделить зону с наименьшими рисками использования гелиоресурсов в республике Алтай – Чойский и Турочакский районы севернее широты 51°30' и лежащие на 50 км к востоку от с. п. Усть-Кан. Территории близ с. Кош-Агач и южнее характеризуются очень высокой суточной изменчивостью, что может быть обусловлено высокогорным положением (более 2000 м над у. м.) данного района.

В связи с очень значительными сезонными климатическими различиями на территории России, важным представляется

Рис. 2. Внутригодовые изменения значений C_v S_r среднемесячных за многолетний период вблизи с. Усть-Кокса

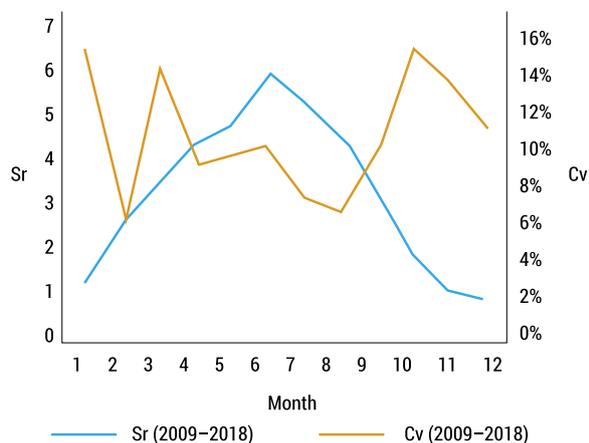
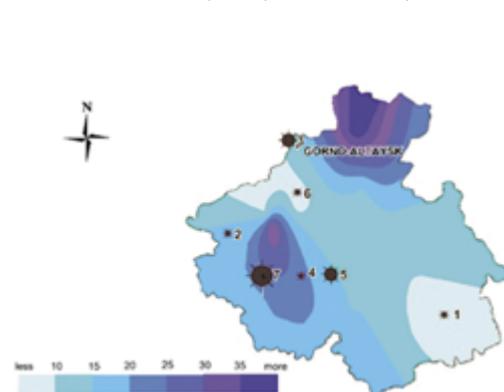


Рис. 3. Карта-схема распределения по территории Республика Алтай среднегодового значения высоты снежного покрова (см) по данным станций ГМС за десятилетний период (2009–2018 гг.)



СЭС	Установленная мощность, МВт	Дата ввода СЭС в эксплуатацию	Произведено ЭЭ IV кв., тыс. кВт·ч	КИУМ IV кв., %	Произведено ЭЭ (2018 г.), тыс. кВт·ч	КИУМ год., %
Кош-Агачская СЭС	5	24.02.2015	1 114	10,09 %	7 421	16,94 %
Кош-Агачская СЭС-2	5	23.03.2016	1 174	10,63 %	7 467	17,04 %
Майминские СЭС (1–2)	20	24.11.2017	2 167	4,9 %	20 316	11,6 %
Усть-Канская СЭС	5	22.11.2016	688	6,23 %	6 329	14,45 %
Онгудайская СЭС	5	24.11.2017	716	6,48 %	5 350	12,21 %

Таблица 1. Результаты выработки электроэнергии на СЭС в Республике Алтай в 2018 г.

Источник: расчеты авторов по данным [19], [20]

и анализ внутригодовой изменчивости статистических характеристик солнечной радиации. Внутригодовой ход изменчивости поступления солнечной радиации на западный регион республики Алтай (близ с. Усть-Кокса), а соответственно – и изменения рисков получения стабильной выработки электроэнергии на фотоэлектрических станциях представлен на графиках. Как видно из рис. 2, в период с марта по сентябрь среднее суточное поступление прямой солнечной радиации (S_r) составляет более 4 кВт·ч/м² в сут. Коэффици-

ент вариации среднемесячных значений S_r в этот период – менее 12 %. В осенне-зимний период же коэффициент вариации значительно выше – до 19 %. Межгодовая нестабильность поступления прямой солнечной радиации в мае месяце была выявлена для с. Мульта Усть-Коксинского р-на, риски использования фотоэлектрических (PV) панелей в этот период возрастают.

Суточные значения характеризуются очень высокой изменчивостью, причем и в летний период – когда высока выработка электроэнергии от работы солнечных

Трасса «Бийск – Горно Алтайск», Чойский район

Источник: michail-82.livejournal.com



панелей (рис. 3). Коэффициент вариации суточных значений S_r составляет летом более 40 %, а в мае-июне – более 70 %. Это доказывает очень низкую достоверность прогнозов выдачи гарантированной мощности от фотоэлектрических панелей на данной территории, и в связи с высокими природно-ресурсными рисками работы PV панелей показывает необходимость обязательного наличия дублирующих мощностей выработки электроэнергии.

Анализ производства электроэнергии на введенных в строй в Республике Алтай солнечных электростанциях путем расчета среднего коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) за определенный период показал большие различия как во времени, так и в зависимости от расположения СЭС (табл. 1). Среднегодовые значения КИУМ варьируются от 17,04 % на Кош-Агачской СЭС-2 до 11,6 % на Майминской СЭС, для осенне-зимнего периода (IV квартал) этот показатель еще ниже – 10, 63 % и 4,9 % соответственно.

Солнечные панели в долине Актру.
Северо-Чуйский хребет, Республика Алтай
Источник: Vadyuhin / Depositphotos.com



Анализ совмещенных карт позволил выделить зону с наименьшими рисками использования гелиоресурсов в республике Алтай – Чойский и Турочакский районы, лежащие на 50 км к востоку от п. Усть-Кан

Сопоставление данных фактора использования СЭС и картосхем, составленных с применением ГИС-технологий показало более лучшее соответствие для картосхем, составленных по расчетам суточной внутригодовой изменчивости поступления солнечной радиации, чем для среднемесячных характеристик. Очевидно, именно оценки суточной изменчивости более перспективно использовать как один из компонентов при выборе локации для строительства солнечных электростанций.

Заключение

Сопоставление результатов оценок рисков гарантированного производства электроэнергии на солнечных электростанциях путем проведения оценок изменчивости инсоляции с применением метода расчетов коэффициентов вариации среднемесячных и суточных значений поступления прямой солнечной радиации и данных об эффективности работы действующих СЭС в Республике Алтай по расчету коэффициента использования установленной мощности показало соответствие выделенных благоприятных для расположения СЭС территорий путем применения ГИС-технологий и районов расположения СЭС с более высокими значениями КИУМ. Проведенные исследования показали возможность и перспективность использования данной методики для оценок природно-ресурсных рисков использования гелиоэнергетических ресурсов. Планируется проведение дальнейших разработок для уточнения методики и проведения оценок в других регионах России с высоким потенциалом гелиоресурсов.



Алтайское село Курай

Источник: zastavkin / Depositphotos.com

Использованные источники

1. Mauleón I. Assessing PV and wind roadmaps: Learning rates, risk, and social discounting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018. vol.100. p. 71–89.
2. Marques-Perez I., Guaita-Pradas I., Gallego A. and Segura B. 2020 Territorial planning for photovoltaic power plants using an outranking approach and GIS. *J. Clean. Prod.* p. 257, 120–602.
3. Rafikova Y., Kiseleva S., Nefedova L., Frid S. 2014 The use of geoinformation technologies for renewable energy and regional aspects of developing renewable energy in Russia. *EPJ Web of Conferences* 2014. p. 79, 1–7.
4. Guaita-Pradas I., Marques-Perez I., Gallego A. and Segura B. 2020 Analysing territory for the sustainable development of solar photovoltaic power using GIS databases. *Environ. Monit. Assess.* p. 192–263.
5. Shorabeh S., Firozjaei M., Nematollahi O., Firozjaei H., Jelokhani-Niaraki M. 2019 A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: A case study in Iran. *new. Energy.* p. 143, 958–973.
6. Gami A., Awasthi A., Ramli M. 2018 Optimal design and analysis of gridconnected photovoltaic under different tracking systems using HOMER. *Energy Convers. Manag.* p. 155, 42–57.
7. Yushchenko A., De Bono A., Chatenoux B., Patela M., Ray N. 2018 GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. *Renew. Sustain. Energy Rev.* p. 81, 2088–2103.
8. Firozjaei M., Nematollahi O., Mijani N., Shorabeh S., Firozjaei H., Toomanian A. 2019 An integrated GIS-based Ordered Weighted Averaging analysis for solar energy evaluation in Iran: current conditions and future planning. *Renew. Energy.* p. 136, 1130–1146.
9. Doorga J., Rughooputh S., Boojhawon R. 2019 Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: a case study in Mauritius. *Renew. Energy.* p. 133, 1201–1219.
10. Sanchez-Lozano J., Garcia-Cascales M., Lamata M., 2016 Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms. *Case study in Spain. J. Clean. Prod.* p. 127, 387–398.
11. Castillo P, Batista C., Lavalle C. 2016 An assessment of the regional potential for solar power generation in UE-28. *Energy Pol.* p. 88, 86–99.
12. Нефедова Л. В., Соловьев А. А. Финансовые методы управления рисками при использовании ВИЭ // *Энергетическая политика*. 2020. № 5 (147). С. 62–75.
13. Нефедова Л.В., Соловьев А.А., Шилова Л.А., Соловьев Д.А. Факторы риска при сооружении энергообъектов на возобновляемых источниках энергии в России // *Вестник МГСУ*. 2016. № 12. С. 79–90.
14. Andenæs E., Jelle B., Ramlo K., Kolås T., Selj J., and Foss S. 2018 The influence of snow and ice coverage on the energy generation from photovoltaic solar cells. *Solar Energy.* p. 159, 318–328.
15. Andrews R., Pollard A. and Pearce J. 2013 The effects of snowfall on solar photovoltaic performance. *Solar Energy.* p. 92, 84–97.
16. Kolomiets Y., Tarasenko A., Tebuev V., Suleymanov M. 2018 Investigation of the influence of various pollution types on operational efficiency of solar power installations in Moscow. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. p. 4–6, 12–24.
17. Kahl A., Dujardin J., Lehning 2019 The bright side of PV production in snow-covered mountains. *MPNAS.* p. 116, 1162–1167.
18. База данных NASA SSE // [Электронный ресурс URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer> Проверено: 20.01.2021]
19. Официальный сайт ГК ХЕВЕЛ // [Электронный ресурс URL: <https://www.hevelsolar.com> Проверено: 20.01.2021]
20. НП Совет рынка. Перечень квалифицированных энергообъектов, функционирующих на основе ВИЭ // [Электронный ресурс URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> Проверено: 20.01.2021]