

Научная статья
УДК 620.92:303.732
ББК 31.15
3-86
DOI: 10.53598/2410-3225-2023-4-331-73-82

**Методика прогнозирования и вероятностно-статистического
анализа экологических рисков в альтернативной
энергетике горного региона**
(Рецензирована)

**Ирина Юрьевна Зорина¹, Юрий Владимирович Саханский²,
Индира Эдуардовна Гаглоева³**

^{1,2} Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный
технологический университет), Владикавказ, Россия

³ Филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федера-
ции, Владикавказ, Россия, gagloeva.indira@yandex.ru

¹ kafedra-toe@skgmi-gtu.ru

² 749951@rambler.ru

Аннотация. Для анализа возможного влияния экологических рисков на генераторные установки, использующие возобновляемые источники энергии в горных условиях предложена методика прогнозирования (с помощью стохастической матрицы) и вероятностного анализа (с помощью метода Монте-Карло) экологических рисков в альтернативной энергетике. Представлен алгоритм реализации методики вероятностного анализа влияния внешних факторов на генераторную установку, который позволяет прогнозировать мероприятия по уменьшению влияния негативных факторов, тем самым улучшает энергетические возможности повышения качества жизни и безопасности жизнедеятельности в условиях труднодоступных регионов горной местности.

Ключевые слова: экологические риски, горный регион, возобновляемые источники энергии, статистическое моделирование, прогнозирование, алгоритм, безопасность

Original Research Paper

**The methodology of forecasting and probabilistic statistical analysis
of environmental risks in alternative energy in the mountainous region**

Irina Yu. Zorina¹, Yuriy V. Sakhansky², Indira E. Gagloeva³

^{1,2} North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

³ Branch of Financial University under the Government of the Russian Federation, Vladikavkaz, Russia, gagloeva.indira@yandex.ru

¹ kafedra-toe@skgmi-gtu.ru

² 749951@rambler.ru

Abstract. For analyze the possible impact of environmental risks on generator sets using renewable energy sources in mountainous conditions, a methodology for forecasting (using a stochastic matrix) and probabilistic analysis (using the Monte Carlo method) of environmental risks in alternative energy is proposed. An algorithm for the implementation of a methodology for probabilistic analysis of the influence of external factors on a generator set is presented, which allows predicting measures to reduce the influence of negative factors, thereby improving the energy possibilities of improving the quality of life and life safety in remote mountainous regions.

Keywords: environmental risks, mountain region, renewable energy sources, statistical model-

ing, forecasting, algorithm, safety

Природные и социально-культурные особенности горных территорий, их удаленность от центров развития и труднодоступность обуславливают сложности их социально-экономического развития, существенно сказываются на уровне жизни местного населения и провоцируют его отток на равнинные территории. Вопросы комплексного развития горных территорий постоянно обсуждаются. Например, на прошедшем недавно Всероссийском форуме «Устойчивое развитие горных субъектов Российской Федерации: законодательство, федеральная и региональные программы» рассмотрены вопросы обоснования актуальности разработки научно обоснованных механизмов решения проблем устойчивого развития горных территорий России. Результатом продолжения форума в Санкт-Петербурге (2023 г.) должна стать «Федеральная программа по развитию горных территорий России»*. Горные территории слабо обеспечены инфраструктурой. Стабильное развитие горных и предгорных территорий возможно на основе энергетической независимости.

Одним из основных элементов энергетической независимости становится использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которое в настоящее время получает все большее распространение для электроснабжения различных объектов [1, 2]. Это особенно актуально для отдаленных горных местностей, находящихся в труднодоступных ущельях, вдали от централизованных систем электроснабжения [3]. В этом случае качество жизни и безопасность жизнедеятельности жителей труднодоступных горных регионов можно существенно повысить за счет использования возобновляемых источников энергии для энергоснабжения.

Особенностью систем энергоснабжения автономных потребителей ВИЭ (альтернативной энергетики) является зависимость от внешних климатических условий. Энергоснабжение от солнечных батарей, ветроустановок, мини ГЭС зависит от условий, в которых находятся генераторные установки.

Так как автономные комплексы ВИЭ непосредственно используют естественные энергетические потоки (солнца, воды и воздуха), то они неизбежно находятся под влиянием погоды. В частности, под влиянием различного рода экологических рисков, обусловленных аномальными изменениями энергетических потоков.

Погода горных регионов характеризуется крайне неустойчивым состоянием: ливневые дожди и ветер летом, снегопады и лавины зимой и т.д. Летом в горном ущелье в течение нескольких часов погода может поменяться от безветренной и ясной до внезапного ветра и ливня. Не менее изменчивой является и погода в горах зимой.

При сильном ветре ветрогенератор может выйти из строя, поэтому его конструкция должна быть приспособлена к изменяющимся внешним условиям. Сильный дождь может привести к разливу реки, что в свою очередь может существенно осложнить работу мини ГЭС. Тучи, ветер, дождь негативно отразятся и на работе солнечных батарей.

Зависимость надежности и безопасности работы преобразовательных установок на возобновляемых источниках энергии от внешних условий создало две основные проблемы. Одна относится к самим преобразовательным установкам и заключается в необходимости предусматривать в конструкции установки возможность учета резкого изменения величины характера действующего фактора (например, направление и скорость ветра). Другая заключается в том, чтобы с помощью соответствующих мероприятий (например, с помощью правильного выбора географического расположения преобразовательной установки) предотвратить или минимизировать воздействие на установку по-

* Резолюция Общественной палаты Российской Федерации по вопросу развития горных территорий субъектов Российской Федерации. 1–2 августа 2023 года. г. Майкоп. URL: <https://files.oprf.ru/storage/documents/rez-ust-razv2911.pdf>

годных аномалий. В этом случае на первый план выступает наличие информации о месте и времени возможного проявления экологических рисков той или иной природы.

В [4] предложены матричные модели как для анализа техногенного воздействия энергетического комплекса использования возобновляемых источников энергии на окружающую природную среду, так и для анализа возможного опасного воздействия окружающей природной среды на энергетический комплекс. В последнем случае для определения влияния природных условий на работу энергетических установок определенного типа необходимо рассмотреть соответствующую строку матрицы с конкретными значениями ее элементов. Этого не было сделано в указанной работе [4], соответствующий вероятностный анализ экологических рисков не был проведен.

Следует отметить, что анализ возникновения возможных аномалий и рисков природного характера для условий горного региона впервые был осуществлен в Северо-Кавказском горно-металлургическом институте (государственный технологический университет) (СКГМИ (ГТУ)). Результаты первого этапа работы изложены в отчете по научно-исследовательской работе «Разработка комплексной методики оценки опасности, уязвимости и риска различной природы в условиях горных регионов», этап 1 «Составление карты опасностей горных территорий (на примере Республики Северная Осетия–Алания) в масштабе 1:200000», Международный Инновационный Научно-Технологический Центр «Устойчивое Развитие Горных Территорий» (МИНТЦ «УРТ») [Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2009. 98 с.].

В настоящей работе предложена методика анализа экологической совместимости различных типов автономных многофункциональных комплексов. Экологическая совместимость предполагает анализ двухстороннего воздействия: автономных многофункциональных комплексов на окружающую природную среду и окружающей природной среды на автономные многофункциональные комплексы. Если в первом случае при рассмотрении техногенного воздействия автономных многофункциональных комплексов на окружающую природную среду возможно внедрение каких-либо санитарных норм, регламентирующих такое воздействие, то во втором случае процесс носит вероятностный характер, и поэтому для его анализа требуется применение методов теории вероятности.

Анализ влияния экологических рисков на установки, используемые возобновляемыми источниками энергии в горных условиях, предлагается реализовать на основе прогноза экологического состояния окружающей природной среды в отношении возможности возникновения природных аномалий различного типа. Для этого можно воспользоваться стохастической матрицей Маркова, с последующим использованием полученных результатов для более подробного анализа возникающих экологических рисков.

Будем классифицировать состояние окружающей природной среды за какой-то промежуток времени – экологическую ситуацию, например, за месяц как: «спокойную» – без аномальных проявлений опасных природных факторов, то есть без проявления экологических рисков; «опасную» – когда за рассматриваемый промежуток времени было зафиксировано какое-либо одно проявление экологического риска (например, сильный ветер – ураган); «особо опасную» – когда за рассматриваемый промежуток времени в зоне наблюдения было зафиксировано более одного проявления экологических рисков, например ливни, оползни, разливы рек и т.п.

Если иметь необходимую информацию о вероятностях появления соответствующих экологических ситуаций в текущем месяце, то в соответствии с выбранными тремя экологическими ситуациями можно построить квадратную стохастическую матрицу, которая описывает, так называемые Марковские процессы. Использование этой матрицы позволяет осуществить прогноз экологических ситуаций на последующие месяцы. Заметим, различают три вида стохастических матриц: правую, сумма строк кото-

рой равна 1; левая – сумма столбцов равна 1; двойная – когда сумма элементов каждой строки и каждого столбца равна 1.

Стохастическая справа матрица является матрицей переходных вероятностей для некоторой цепи Маркова. В данной работе под цепями Маркова будем понимать Марковские процессы с дискретным временем.

Обозначим стохастическую матрицу буквой $[A]$, а ее элементы a_{ij} – значения вероятностей перехода из i -го состояния в j -ое, $0 \leq a_{ij} \leq 1$, $\sum_{j=1}^n a_{ij} = 1$. В случае указанной выше классификации «спокойная»-«опасная»-«особо опасная» стохастическая матрица будет иметь вид (рис. 1):

$$[A] = \begin{array}{c} \begin{array}{l} \text{«спокойная»} \\ \text{«опасная»} \\ \text{«особо опасная»} \end{array} \begin{array}{l} \text{«спокойная»} \\ \text{«опасная»} \\ \text{«особо опасная»} \end{array} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \end{array}$$

Рис. 1. Стохастическая матрица перехода между экологическими ситуациями «спокойная»-«опасная»-«особо опасная»

Fig. 1. The stochastic transition matrix for the “calm”-“dangerous”-“especially dangerous” environmental situations

Если положить на основе наблюдений, расчетов и перспективного анализов, что экологическая ситуация в текущем месяце определяется некоторым вектором состояния, то можно вычислить вероятность экологической ситуации в следующем месяце.

Например, в результате наблюдений, расчетов, ретроспективного и перспективного анализов установлено, что если в текущем месяце экологическая ситуация окажется спокойной, то в следующем месяце вероятность спокойной ситуации будет a_{11} , вероятность опасной a_{12} , а вероятность особо опасной a_{13} . Если в текущем месяце ситуация опасная, то в следующем месяце вероятности спокойной, опасной и особо опасной ситуации будут соответственно a_{21} , a_{22} , a_{23} . Если в текущем месяце ситуация оказалась особо опасной, то в следующие месяцы вероятность спокойной, опасной и особо опасной ситуации будут соответственно a_{31} , a_{32} , a_{33} .

Полученная таким образом матрица $[A]$ является переходной матрицей марковской цепи испытаний с тремя исходами. Под марковской цепью, как известно, понимают последовательность испытаний в некотором эксперименте, если исход « n »-ого испытания зависит только от исхода « $n-1$ » испытания и не зависит от исходов других предшествующих испытаний [5]. Марковский процесс – это стохастический процесс без памяти, который запоминает только текущее состояние, чтобы предсказывать будущие состояния.

В рассматриваемом случае это означает, что экологическая ситуация в « $n+1$ »-ом месяце зависит только от ситуации в « n »-ом месяце, что в действительности не всегда выполняется. Несмотря на то, что экологическая ситуация текущего месяца может оказывать наибольшее влияние на ситуацию в следующем месяце, влиянием ситуаций более ранних месяцев тоже нельзя пренебрегать. Тем не менее, учитывая опыт применения марковских цепей для получения краткосрочных и долгосрочных прогнозов [5, 6], можно надеяться на адекватность получаемых выводов.

Таким образом, в работе выбраны три типа экологической ситуации: «спокойная», «опасная» и «особо опасная», что соответствовало построению переходной матрицы размером 3×3 . Для построения более полной картины исследуемого процесса влияния экологии рисков можно дополнительно к трем выбранным ситуациям доба-

вить ситуацию «катастрофическая», которая соответствует возникновению экологической катастрофы бедствия регионального или более масштабов. Введение четвертого состояния по аналогичной методике позволяет сформировать переходную матрицу размером 4×4 . В общем случае добавление новых ситуаций позволяет сформировать переходную матрицу размера $N \times N$. Методика применения переходной матрицы марковской цепи для оценки возможности возникновения экологических рисков представлена на рисунке 2.

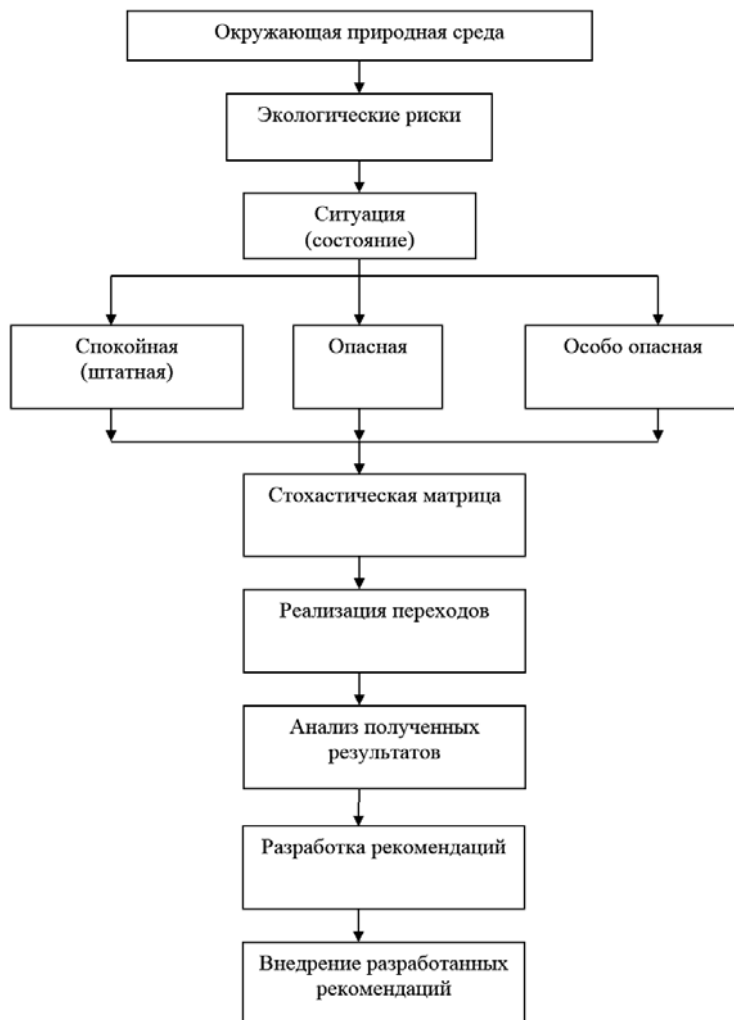


Рис. 2. Методика применения переходной матрицы марковской цепи для оценки возможности возникновения экологических рисков

Fig. 2. Procedure for using the transition matrix of the Markov chain to assess the possibility of environmental risks

Применение переходной матрицы, например, $[A]$ (рис. 1), позволяет прогнозировать поведение окружающей природной среды в отношении возможных проявлений экологических рисков в последующем месяце. Например, для получения информации о поведении окружающей природной среды двумя месяцами позже следует вычислить элементы матрицы $[B]$:

$$[B] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = [A]^{(2)}. \quad (1)$$

Матрица $[B]$ является двухшаговой переходной матрицей марковской цепи. Ее элементы получаются, как известно, перемножением матриц $[A]$.

В общем случае при учете « N » возможных состояний (ситуаций) элемент b_{ij} матрицы [B] вычисляется по формуле:

$$b_{ij} = a_{i1} \cdot a_{1j} + a_{i2} \cdot a_{2j} + \dots + a_{iN} \cdot a_{Nj} = \sum_{k=1}^N a_{ik} \cdot a_{kj}. \quad (2)$$

Формула (2) показывает, что двухшаговая вероятность перехода b_{ij} представляет собой сумму « N » членов – по одному на каждую из возможных промежуточных ситуаций.

С помощью полученной матрицы [B] можно определить, например, вероятность спокойного состояния окружающей природной среды двумя месяцами позже (элемент b_{11}), если в месяц наблюдения ситуация была спокойная. Вычисляя, например, $[A]^{(3)}$ можно сделать прогнозы и на более поздние сроки. Для анализа возможного влияния экологических рисков на различные энергетические установки, основанные на ВИЭ в конкретный, выделенный для исследования период, например, определяемый как «опасная» ситуация, можно воспользоваться эффективным методом исследования вероятностных процессов – методом Монте-Карло, а также другими методами анализа энергетических и информационных потоков [5–8]. Алгоритм с использованием метода Монте-Карло изображен на рисунке 3.



Рис. 3. Алгоритм вероятностного анализа влияния внешних факторов на энергетическую генераторную установку

Fig. 3. Algorithm for probabilistic analysis of the influence of external factors on the power generator unit

Для исследования внешних факторов, влияющих на генераторную установку, использующую возобновляемые источники энергии, необходимо, прежде всего, в соответствии с алгоритмом рисунка 3 разработать математическую модель работы установки, которая учитывает (количественно или качественно) влияние на нее внешних природных факторов, вызываемых, в частности, экологическими рисками.

После этого следует выбрать (в соответствии с алгоритмом рисунка 2) ситуацию для дальнейшего исследования, определить ее основополагающие опасные факторы и для этой ситуации определить действующие случайные факторы в соответствии с алгоритмом рисунка 3.

Например, появление сильного ветра. Несмотря на тот факт, что среднегодовые скорости ветра в различных населенных пунктах Республики Северная Осетия–Алания примерно одинаковые – около 1,5 м/с, существуют промежутки времени, когда максимальная скорость достигает 30 м/с (см. таблицу 1). Поэтому это необходимо учитывать при формировании элементов стохастической матрицы.

Таблица 1

Характеристики ветров в Республике Северная Осетия–Алания
 Table 1. Wind characteristics in the Republic of North Ossetia–Alania

Расположение метеостанции	Среднегодовая скорость ветра (на высоте 10 м)	Средняя скорость ветра (м/с)				Максимальная скорость ветра (м/с)
		Зима	Весна	Лето	Осень	
г. Владикавказ	1,1	1,0	1,3	1,2	1,0	30
г. Алагир	1,4	1,0	1,5	1,5	1,3	21
г. Моздок	1,6	1,4	1,8	1,7	1,4	28

Примечание. Данные с сайтов:
<https://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/severnoyij-kavkaz/respublika-severnaya-osetiya-alaniya>;
<https://ru.meteocast.net/forecast/ru/alagir/>;
<http://rc.vedds.ru/> Сайт Главного управления МЧС России по Республике Северная Осетия–Алания;
 URL: <https://15.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya/prognozy>

Далее по методу Монте-Карло (блок «Реализация метода Монте-Карло» на рисунке 2) осуществляется предварительное определение (задание) вероятностных характеристик влияющих факторов. После соответствующих вычислительных операций проводится оценка влияния случайных факторов. В результате рассматривается неравенство, определяющее выход на завершение алгоритма: вероятность появления отклонения δ_k влияющего фактора большего, чем нормированное значение δ_H , должно быть меньше допустимой величины вероятности:

$$P(\delta_k \geq \delta_H) \leq P_{\text{доп}}. \quad (3)$$

Если условие (3) выполняется, то ситуацию можно считать устойчивой, и процесс моделирования на этом заканчивается. Если условия не выполняются, то необходимо реализовать мероприятия по уменьшению влияния случайных факторов и повторить вычисления.

Существенным моментом при составлении стохастической матрицы и статистическом моделировании является, во-первых, правильный рациональный выбор периода рассмотрения проявлений экологических рисков (день, неделя, месяц и т.п.) и, во-вторых, ограничение по длительности применения стохастической матрицы и периода моделирования (лето, зима, полный год т.п.), гарантирующих получение адекватных выводов.

В первом случае при выборе периода рассмотрения проявлений экологических рисков следует руководствоваться сроками повторяемости инцидентов, определенными

на основании результатов наблюдений. Например, если в качестве инцидентов** при определении состояния окружающей природной среды рассматриваются такие природные явления, как ураганы, ливни, оползни, камнепады и т.д., то период рассмотрения, равный одному дню, будет явно заниженным, так как указанные инциденты не могут повторяться каждый день или, например, через день.

Практически обоснованным будет период рассмотрения в 1 месяц, так как эти явления наблюдаются обычно не чаще одного раза в месяц. Возможность применения стохастической матрицы, построенной на основании проявления именно этих данных, очевидно будет ограничиваться периодом лето-осень.

Кроме указанных временных факторов, важной характеристикой является продолжительность времени перехода системы из состояния i в состояние j , то есть так называемое время первого достижения. Поэтому в предлагаемой методике возникает новая проблема определения (учета) среднего времени достижения.

Для сокращения сценариев моделирования по методике алгоритма, представленного на рисунке 2, с использованием цепи Маркова и метода Монте-Карло можно предложить простой подход учета и сопоставления условных моментов по принципу максимальной энтропии. Это позволит, например, для безопасности энергосистемы учитывать реакцию генератора при изменении мощности (скорости) ветра, нагрузки или потерянной генерации. Даст возможности расчета поддержания баланса мощности после внезапного нарушения, такого как потерянная генерация, гарантирует стабилизацию частоты энергосистемы.

Статический смысл энтропии состоит в том, что энтропия системы, находящейся в определенном состоянии, пропорциональна логарифму числа микросостояний, которыми может быть реализовано данное состояние, то есть

$$S = k \ln W,$$

где W – это мера вероятности.

Эта формула применима во всех системах – физических, экономических, социальных и других и позволяет рассматривать энтропию как количественную меру беспорядка или хаоса в системе. Энтропия становится мерой неопределенности данных, которая может иметь различные результаты. Она показывает, насколько сложно делать предсказания о событиях, описываемых вероятностным распределением. Чем больше энтропия, тем труднее делать предсказания. Если дисперсия является адекватной мерой рассеяния лишь для специальных распределений вероятностей случайных величин (например, для распределения Гаусса), то энтропия не зависит от типа распределения. Она присутствует всегда.

Энтропия цепи Маркова с вектором начальных вероятностей $p(E_1), p(E_2), \dots, p(E_n)$ (рис. 4) находится как математическое ожидание условных энтропий системы E относительно всех ее состояний E_1, E_2, \dots, E_n (см., например, пп. 1.1., 1.2., 5.2, 5.3 из книги [9]):

$$S(E) = \sum_{i=1}^N p(E_i) \cdot S(E/E_i), \text{ где } S(E/E_m) = \sum_{i=1}^N p_{mi} \lg \left(\frac{1}{p_{mi}} \right).$$

Нахождение энтропии цепи Маркова с вектором начальных вероятностей $(p(E_1), p(E_2), \dots, p(E_n))$ допускает удобную интерпретацию на графе (рис. 4).

Таким образом, в работе представлена методика оценки анализа и прогнозирования влияния возможного опасного воздействия окружающей природной среды на энергетический комплекс горного региона.

** Отметим, что под инцидентом, в соответствии с федеральным законом 116-ФЗ от 21.07.1997, понимается отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от установленного режима технологического процесса.

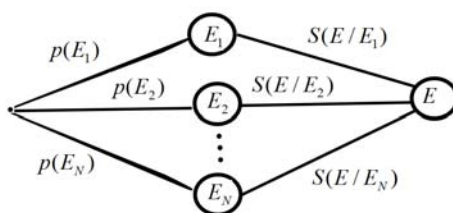


Рис. 4. Интерпретация нахождения энтропии цепи Маркова в форме графа
Fig. 4. Interpretation of finding the entropy of the Markov chain in the form of a graph

Рассмотрена возможность применения стохастического моделирования и статистического моделирования для прогнозирования и вероятностного анализа экологических рисков в системе альтернативной энергетики горного региона, которая позволяет выработать прогнозные варианты экологического состояния окружающей природной среды, оценить вероятность возникновения экологических рисков как опасных проявлений аномальных естественных природных процессов, в частности в системе энергообеспечения труднодоступных горных районов, что непосредственно будет способствовать повышению качества жизни и безопасности жизнедеятельности жителей горных регионов.

Примечания

1. Международное энергетическое агентство (МЭА). Ключевая статистика мировой энергетики 2010. Париж, 2010. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010> (дата обращения: 01.10.2023).
2. Куашнинг Ф. Системы возобновляемых источников энергии. Нур-Султан (Астана); Санкт-Петербург: Фолиант, 2013. 432 с.
3. Зорина И.Ю. Анализ возможных направлений развития возобновляемой энергетики в условиях горных территорий (на примере РСО-Алания) // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 3 б. С. 47-50.
4. Матричная модель экологической совместимости автономного комплекса преобразования возобновляемой энергии для условий горного региона / Ю.С. Петров, И.Ю. Зорина, М.К. Хадилов, Е.А. Гуриева // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 2. С. 16-23.
5. Колмогоров А.Н., Журбенко И.Г., Прохоров А.В. Введение в теорию вероятностей. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 188 с.
6. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. Москва: Академия, 2006. 192 с.
7. Саханский Ю.В., Гаглоева И.Э., Соин А.М. Оптимизация информационных потоков и разработка модели организации информационного пространства в цифровой энергетике // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77, № 8. С. 375-380.
8. Гаглоева И.Э. Разработка алгоритмов оптимизации бизнес-процессов взаимодействия с клиентами в газораспределительной организации // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77, № 9. С. 417-422.
9. Стратонович Р.Л. Теория информации. Москва: Сов. радио, 1975. 424 с.

References

1. International Energy Agency (IEA). Key World Energy Statistics 2010. Paris, 2010. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010> (access date: 01/10/2023).
2. Kuashning F. Renewable energy systems. Nur-Sultan (Astana); St. Petersburg: Foliant, 2013. 432 p.
3. Zorina I.Yu. Zorina I.Yu. Analysis of possible directions for the development of renewable energy in mountainous areas (based on the Republic of North Ossetia-Alania) // Life Safety. 2018. No. 3 b. P. 47-50.
4. Matrix model of ecological compatibility of an autonomous renewable energy conversion complex for the conditions of a mountainous region / Yu.S. Petrov, I.Yu. Zorina, M.K. Khadikov, E.A. Gurieva // Science and Business: Ways of Development. 2022. No. 2. P. 16-23.
5. Kolmogorov A.N., Zhurbenko I.G., Prokhorov A.V. Introduction to probability theory.

Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research, 2003. 188 p.

6. Mikhaylov G.A., Voytishek A.V. Numerical statistical modeling. Monte Carlo methods. Moscow: Academia, 2006. 192 p.

7. Саханский Ю.В., Gagloeva I.E., Соин А.М. Optimization of information flows and development of the model for organizing information space in digital energy // Automation. Modern Technologies. 2023. Vol. 77, No. 8. P. 375–380.

8. Gagloeva I.E. Development of algorithms for optimizing business processes of interaction with consumers in a gas distribution organization // Automation. Modern Technologies. 2023. Vol. 77, No. 9. P. 417–422.

9. Stratonovich R.L. Information theory. Moscow: Sov. radio, 1975. 424 p.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.10.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 26.10.2023; approved after reviewing 29.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.

© И.Ю. Зорина, Ю.В. Саханский, И.Э. Гаглоева, 2023